摄 影 仪 器

李 为 李德熊 陈南光 编著

北京理工大学出版社

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

(京)新登字 149 号

内容简介

本书是为高等工科院校光学技术与光电仪器专业本科生编写的教材，书中系统地、详细地阐述摄影仪器总成及各主要组成部分的功能、构造、工作原理和基本设计计算方法，还概括地阐述了摄影基本理论及感光材料性能等有关知识。除普通摄影外，还包括空中摄影、高速摄影及图像合成等内容，兼顾普通相机及其他摄影仪器，以适应通用性的需要。本书还可作为研究、设计、生产、使用摄影仪器的工程技术人员和专业及业余摄影工作者、爱好者的参考书。

摄影仪器
李 为 李德熊 陈南光 编著
*
北京理工大学出版社出版发行
各地新华书店经售
北京市万龙图文信息公司照排
北京地质印刷厂印刷
*
787×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 407 千字
1994 年 11 月第一版 1994 年 11 月第一次印刷
ISBN 7－81013－957－6/TN・52
印数：1－ 1500 册 定价：16.00元

出 版 说 明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神，中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材的出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任，建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组。以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的"抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导"的"八五"教材建设方针，兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991—1995年兵工类专业教材编写出版规划，共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑，对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由李为主编，唐良桂主审，经中国兵器工业总公司光学技术与光电仪器专业教学指导委员会复查，兵总教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1993年11月

前　言

摄影仪器是光学仪器中一个重要的门类，它利用光线在感光材料上的作用客观地逼真地记录景物的影像，是获取、保存、传播和交流信息，特别是图像信息的有力工具。人类认识外在世界的信息中有 80%依靠视觉接收和识别，但是人的视力很有限，太大的和太小的，太远的和太近的，太亮的和太暗的，变化太快的和太慢的，以及超出可见光范围以外的，我们不是看不清就是看不见。人的记忆保存图像细节的能力也很差，而且随着时间的推移，留在记忆中的映象将越来越模糊。摄影仪器，包括普通的小型照相机和各种专用摄影机，如全景摄影机、显微摄影机、远程摄影机、航空摄影机、高速摄影机、红外摄影机等，以及应用摄影技术研究、记录各种现象的装置，不但延伸了人的感觉器官，增强了我们观察和认识世界的能力，而且为人们提供了长期保存信息的重要手段。所以，摄影仪器在文化、教育、科学研究、生产、军事等各领域各部门有着十分广泛的用途。

本书系统、详细地阐述摄影仪器总体及各主要组成部分的功能、构造、工作原理和基本设计计算方法，是为高等工科院校光学技术与光电仪器专业本科生写的教材，也可作为研究、设计、生产、使用摄影仪器的工程技术人员和专业及业余摄影工作者、爱好者的参考读物。

全书共分十章。第一章是关于摄影过程原理，感光材料特性和测定方法，以及摄影影像质量评价方法的基本知识，了解这些基本知识是学习以后各章的基础，也是掌握摄影仪器工作原理和设计原则的出发点。第二章概述摄影仪器的总体组成和类型，介绍几种主要的摄影方法和摄影仪器的原理、特点和应用。摄影仪器虽然种类繁多，它们仍有许多基本的共同点，所以，我们把讨论的重点放在这些共性的问题上。从第三章到第九章分别讨论摄影物镜、可变光阑、快门、曝光量控制、取景系统、调焦系统、输片系统等摄影仪器各基本部分的功能、结构、工作原理和设计问题，同时也有选择地适当介绍一些比较普遍存在于某一类或几类摄影仪器中的特殊问题。在内容和选材上，除了地面摄影用的各种小型照相机外，还包括在遥感中广泛使用的航空摄影机；除了传统的光学系统与精密机械结构外，还包括近年来发展的微电子和微计算机技术在自动曝光控制和自动调焦中的应用。第十章集中讨论了航空摄影中的像移和像移补偿问题。

本书在 1986 年李德熊教授主编的同名教材的基础上，根据这几年教学和科学研究的实践经验和摄影仪器的发展，进行增删和修改，其中大部分内容都是重新编写的。限于我们的水平，加上科学技术日新月异的发展，书中难免会有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

本书由李为主编，唐良桂主审。参加编写工作的有李德熊教授编著第一、二、三、七、八章，陈南光高级工程师编著第六章，李为副教授编著其余各章并统编全书。唐良桂教授在审阅中提出了许多宝贵的意见，并为编写工作提供了不少资料，北京理工大学工程光学系摄影与遥感技术教研室的其他同志也给予了热情的支持，在此一并表示深切的感谢。

作　者

1993 年 7 月

目　录

第一章　摄影与感光材料基础知识

§1-1　感光材料的基本组成和分类 …………（1）

1-1.1　感光乳剂 …………（1）

1-1.2　片基 …………（6）

1-1.3　附加层 …………（7）

§1-2　摄影过程及其机理 …………（8）

1-2.1　摄影曝光过程 …………（8）

1-2.2　摄影加工过程 …………（10）

§1-3　彩色摄影 …………（12）

1-3.1　视觉三色理论 …………（12）

1-3.2　采用多层彩色感光材料的彩色摄影 …………（14）

§1-4　一步摄影 …………（15）

§1-5　红外摄影和光谱带摄影 …………（17）

1-5.1　红外摄影 …………（17）

1-5.2　光谱带摄影 …………（19）

§1-6　电摄影 …………（20）

§1-7　摄影材料的感光特性 …………（21）

1-7.1　感光特性曲线 …………（23）

1-7.2　反差系数 …………（23）

1-7.3　宽容度 …………（25）

1-7.4　感光度 …………（26）

1-7.5　彩色平衡 …………（33）

1-7.6　光谱感光度(感色性) …………（34）

§1-8　感光测定 …………（34）

1-8.1　曝光 …………（34）

1-8.2　显影加工 …………（36）

1-8.3　密度测量 …………（36）

§1-9　摄影影像质量的评价 …………（37）

1-9.1　颗粒性和颗粒度 …………（37）

1-9.2　清晰性和清晰度 …………（40）

1-9.3　分辨率和调制传递函数 …………（41）

第二章　摄影仪器概论

§2-1　摄影仪器的基本组成和分类 …………（43）

§2-2　普通摄影仪器 …………（44）

§2-3　地面远程摄影仪器 …………（46）

§ 2-4　航空摄影机 …… (48)
2-4.1　分幅摄影 …… (48)
2-4.2　缝隙摄影 …… (51)
2-4.3　全景摄影 …… (52)
§ 2-5　多谱段摄影系统 …… (56)
§ 2-6　高速摄影机 …… (59)
2-6.1　单幅高速摄影 …… (60)
2-6.2　连续高速摄影 …… (61)
第三章　摄影物镜
§ 3-1　摄影物镜的光学性能 …… (68)
§ 3-2　摄影物镜的类型 …… (81)
§ 3-3　镜头与机身的连接 …… (83)
第四章　可变光阑
§ 4-1　概　述 …… (86)
§ 4-2　可变光阑的类型和结构 …… (89)
§ 4-3　可变光阑的设计计算 …… (95)
4-3.1　虹彩光阑的设计计算 …… (96)
4-3.2　双片光阑的设计计算 …… (105)
第五章　快　门
§ 5-1　概　述 …… (107)
§ 5-2　中心快门 …… (111)
5-2.1　中心快门的类型和结构 …… (111)
5-2.2　中心快门的特性 …… (119)
5-2.3　中心快门动力弹簧的计算方法 …… (126)
§ 5-3　程序快门 …… (132)
5-3.1　程序快门的类型和结构 …… (132)
5-3.2　程序快门的特性 …… (137)
5-3.3　程序快门程序曲线的计算方法 …… (138)
§ 5-4　百叶窗快门 …… (140)
§ 5-5　帘幕快门 …… (141)
5-5.1　帘幕快门的类型和结构 …… (141)
5-5.2　帘幕快门的特性 …… (149)
第六章　曝光量控制
§ 6-1　曝光参数方程 …… (156)
§ 6-2　一般照相机中曝光量控制方式 …… (160)
§ 6-3　曝光参数的引入 …… (161)
6-3.1　亮度的测定 …… (161)
6-3.2　曝光参数 SV、AV 和 TV 的引入 …… (166)
§ 6-4　半自动控制曝光量的基本原理 …… (172)
6-4.1　微型电流表指示型半自动控制曝光量的基本原理 …… (172)
6-4.2　发光二极管(LED)跳灯指示型半自动控制曝光量的基本原理 …… (174)

§6-5　自动控制曝光量的基本原理……………………………………………………(180)
6-5.1　微型电流表自动控制曝光量的基本原理 ……………………………………(180)
6-5.2　模拟电子电路自动控制曝光量的基本原理 …………………………………(182)
6-5.3　数字电路和微机自动控制曝光量的基本原理………………………………(191)
§6-6　光电法测定像面曝光量 ……………………………………………………(195)
§6-7　航空摄影机中曝光量的自动控制 …………………………………………(197)
第七章　取景观察系统
§7-1　虚像式取景器 ……………………………………………………………(200)
§7-2　实像式取景器 ……………………………………………………………(202)
§7-3　取景视差和消视差机构 …………………………………………………(203)
第八章　调焦系统
§8-1　焦深和景深 ………………………………………………………………(206)
§8-2　调焦方式和调焦机构 ……………………………………………………(209)
§8-3　光学测距器 ………………………………………………………………(211)
§8-4　对焦屏 ……………………………………………………………………(213)
§8-5　自动调焦系统 ……………………………………………………………(217)
8-5.1　测距方式的自动调焦 …………………………………………………(217)
8-5.2　聚焦检测方式的自动调焦………………………………………………(222)
第九章　输片系统
§9-1　输片机构 …………………………………………………………………(225)
9-1.1　等量输片机构的原理 …………………………………………………(226)
9-1.2　输片机构的类型和结构 ………………………………………………(227)
§9-2　展平机构 …………………………………………………………………(237)
§9-3　计片装置 …………………………………………………………………(239)
§9-4　记录装置 …………………………………………………………………(241)
第十章　像移和像移补偿
§10-1　航空摄影中像移的计算公式………………………………………………(247)
§10-2　像移补偿方法和补偿机构…………………………………………………(251)
主要参考文献……………………………………………………………………(256)

第一章　摄影与感光材料基础知识

§1-1　感光材料的基本组成和分类

这里讨论的感光材料，是指在光辐射照射下能按一定规律发生光化学变化，经过适当的化学加工（显影、定影）处理后，能够以一定形式（黑白影调或彩色影像）表现出所受辐照程度的材料。它是我们在照相中所使用的胶片、胶卷、干板和相纸等材料的总称，一般可分黑白感光材料和彩色感光材料两大类。黑白感光材料是以不同浓淡程度的单色影调变化来表现被摄景物的形象，而彩色感光材料则能用丰富的色彩再现出绚丽多彩的被摄景物。

不论是黑白感光材料，还是彩色感光材料，按其用途一般可分成：负性感光材料、正性感光材料和反转感光材料三类。

（1）负性感光材料。用于直接拍摄景物，经曝光和显影加工后得到明暗与被摄景物相反的影像，对于彩色感光材料来说则得到色彩为被摄景物补色①的影像。通常在照相机和电影摄影机里所用的都是这种材料。经拍摄和冲洗加工后的负片就是一般所谓的“底片”。

（2）正性感光材料。它用于对各种底片进行复印。由于底片的影调或色彩与景物为互补，因此用正性感光材料得到的影像，其明暗和色彩便都与被摄景物相一致。我们通常看到的照片、电影放映用的影片（“拷贝”）以及幻灯机放映用的幻灯片都是用正性感光材料制成的。

（3）反转感光材料。反转感光材料与正性和负性感光材料不同，它经过曝光和特殊的反转冲洗加工后，得到的是与被摄景物相同的影像。一般用于照相机中拍摄景物后，可直接制成幻灯片供投影放映。若用于复制底片时，则可得到一张和底片影像一致的“翻底片”。

感光材料是由感光乳剂涂布在支持体（片基）上制成的，所以感光材料的主要组成部分是乳剂层和片基。乳剂层是对光敏感的物质，它的基本成分是明胶和卤化银。在支持体上除了涂布乳剂层外，根据不同的性能要求还涂以底层、保护层、隔层、滤色层、防光晕层等各种附加层。这样，就使感光材料的实际构造变得复杂多样。图 1-1 列举了几种典型感光材料的结构示意图。

1-1.1　感光乳剂

乳剂层的主要成分是卤化银、明胶和补加剂。卤化银以极细微的颗粒状态均匀地分散在明胶中，明胶起着卤化银颗粒保护体的作用，它是乳剂层的主要成膜物质。此外，乳剂中还需加入多种补加药剂，以提高乳剂的感光度②，并使其具有一定的感色性、稳定性和防腐性。

一、卤化银

卤化银是感光乳剂中的感光物质，它以细微的晶体状态分散在明胶中，占乳剂总重量的

---

① 补色的定义见 §1-3。

② 关于感光材料的感光特性，在 §1-7 中详细讨论。

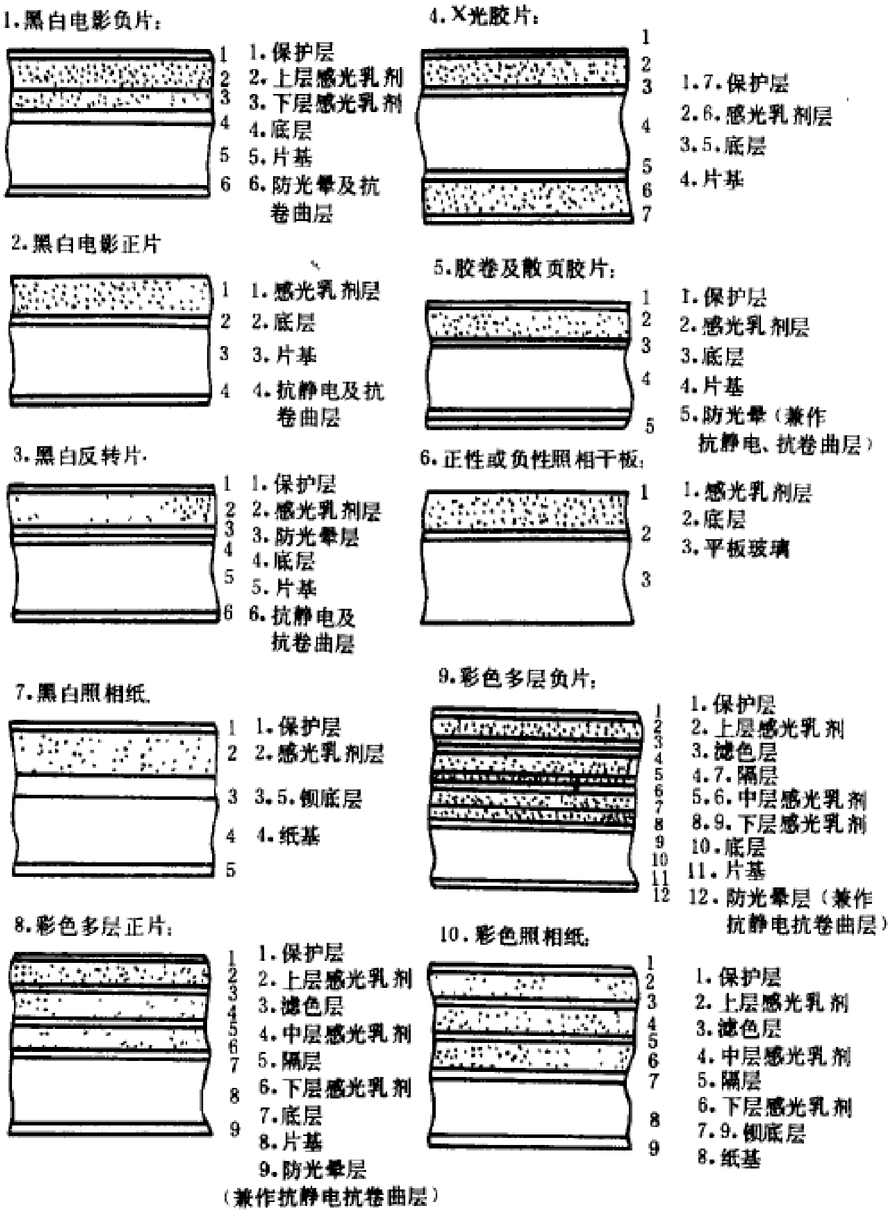


图 1-1 几种典型感光材料结构示意图

30%～40%。卤化银难溶于水,在光线下分解出银,逐渐变黑,这些特性是制造感光材料必不可少的条件。感光乳剂所用的卤化银为溴化银(AgBr)、氯化银(AgCl)和碘化银(AgI),它们的感光性能依次为:溴化银最快、氯化银次之、碘化银最慢。但如在溴化银乳剂中加入微量碘化银,则其感光度较纯溴化银更快。氟化银因易溶于水,因此在乳剂制备中没有实用价值。

在乳剂制备中很少使用单一的卤化银,通常依乳剂的照相性能按不同比例使用所谓复合性的卤化银,例如在制备低感光度乳剂时(用于相纸、幻灯片等正性材料)经常使用氯溴化银,溴化银与氯化银的比例大约各占总银量的 5%和 95%,在制备高感光度乳剂时(用于负性材料)往往使用溴碘化银,碘化银与溴化银相对于总银量的比例也是 5%和 95%。在有些感光材料品种中(例如黑白电影负片),还采用涂布两层乳剂层的办法(上层乳剂层感光度较高,下层乳剂层感光度较低),以增加摄影宽容度。

银是照相乳剂的主体,它决定着乳剂涂层的厚度和显影后的光学密度。乳剂其它成分都是以含银量为依据确定的。含银量以每公斤乳剂中含纯金属银的克数表示。普通感光材料的含银量在 20～60g/kg 之间。相纸类略低些,在 10～20g/kg 左右。这是因为相纸的基底是不透明的,所以相纸感光膜中形成影像的银粒可以少些。

感光乳剂中卤化银的颗粒性是一个很重要的特性，因为被摄景物的影像是由卤化银还原成颗粒状银所构成。在感光过程中，卤化银颗粒是单个地起作用的，每个颗粒形成潜影的一个单位，也就是一个显影单位。在正常曝光范围内，可显影的颗粒数目随着曝光量的增加而增加①。

感光乳剂中卤化银颗粒大小很悬殊，最大的直径在 20～50μm，最小的直径仅 50nm，大部分晶体颗粒在 0.1～4μm 之间。卤化银颗粒大，易感光，颗粒小，则不易感光。卤化银颗粒的大小，不仅影响感光材料的感光度，而且也与画面的分辨率和质感有关。

卤化银的晶体结构为正立方体结构。以典型的溴化银为例，在溴化银晶体结构中每个带正电荷的银离子(Ag^+)周围有六个带负电荷的溴离子(Br^-)，同样，每个溴离子周围也有六个银离子。它们均按一定的规律对称地排列着，两个相邻离子间不仅有固定的距离②，而且有固定的角度。这种有规则的空间排列在晶体化学上称为点阵结构，而这种规则地对称排列的晶体又称为理想晶体。理想晶体在自然界是极其稀少的。在乳剂制备中，由于乳剂配方、明胶类型和工艺条件等因素的影响，乳剂颗粒大多为扁平的三角形和六角形，以及少许针状和圆形晶体。这些不规则的有某些缺陷的晶体体现了晶体的不完整性。晶体的不完整性是由于在晶体形成过程中离子迅速聚集，以及受外部因素影响使各晶面生长不平衡所致。卤化银晶体的不完整性破坏了理想晶体结构的固有平衡，造成晶体结构中的薄弱环节，而正是这些薄弱环节才使卤化银具有感光性能。我们将在§1-2 中详细讨论。

二、明胶

明胶又称凝胶或精胶，是一种天然蛋白质，属于蛋白质中的硬蛋白类。它由牛皮、猪皮及骨头所提炼成。用骨制备的明胶也叫骨胶。在制备骨胶时先用酸处理掉骨中的无机物，留下有机组分叫骨胶原。胶原是明胶的初始产物，不溶于水。胶原在酸、碱或酶的作用下水解生成蛋白质，才是制备感光材料的明胶。良好的明胶无色、无臭、无味、有吸湿性。

明胶在乳剂中起着保护胶体和粘合剂的作用，使卤化银颗粒悬浮而不沉淀聚积。明胶还是制备底层、保护层和防光晕层等不可缺少的原料。明胶具有独特的物理性能和化学组分，对照相性能有着极其重要的影响。

明胶是一种两性物质。它在高 pH 值下呈酸性，在低 pH 值下呈碱性。明胶在冷水中吸水膨胀但不溶解，在热水中溶解。明胶膨胀后有许多小孔，便于显影加工时，显影剂和定影剂能迅速穿过小孔与卤化银发生反应，也便于水洗时洗掉硝酸钾等盐类，但不让金属银逃脱。冲洗后机械强度不受到损害。

明胶中含有极微量的活性物质，能够提高乳剂的照相性能。这些杂质大多带有还原性或含有活泼的硫原子，可使卤化银晶体上生成银或硫化银的质点，形成所谓感光中心（或感光核）。明胶中的这些活性物质按其所引起的功能可分为：抑制剂（抑制卤化银晶体的增长）、增感剂、反差促进剂或减感剂等。

明胶的化学成分较为复杂，常常不是恒定的。由于制造明胶所用的原料不同（如前所述，明胶的原料是兽皮和兽骨，这些原料主要来自食品厂和屠宰厂，兽种、兽龄以及皮骨部位对明胶

---

① 详见§1-2 的讨论。

② 处于最近距离的 Ag^+和 Br^-的间隔，在纯溴化银中为 28.87nm。当在溴化银中一点一点地加入碘化银时，这个晶格的间隔逐渐扩大。如果加进氯化银，则反而使间隔变窄。从而影响复合性乳剂的感光度。

的特性有很大影响），生产工艺过程不同，使明胶的组分和性能存在很大差异，即使同一工厂出品的不同批号的胶片，在感光特性上亦略有差异。另外，明胶在干燥时发脆，在潮湿条件下易粘连，亦易受细菌侵蚀。因此，尽管一百多年来明胶一直是感光材料最重要原料，人们仍需要寻找一种比明胶更为优越的物质来代替它。几十年来曾试图用合成高分子化合物来取代明胶，并取得了某些进展（例如在核子乳剂中用部分高分子化合物取代明胶），但由于高分子化合物限制卤化银晶体的增长、不易水洗和难于显影加工等原因，迄今为止还不能完全代替明胶。

各种感光材料的乳剂层厚度是不同的。一般来说，正性材料的乳剂层薄，负性材料的乳剂层厚。例如：低感干板 12～16μm，负性干板 16～24μm，正性胶片 10～12μm，负性胶片 14～18μm，相纸 6～12μm。用于特殊用途的感光材料（例如核子照相乳剂），乳剂层的厚度可达数百微米。

三、补加剂

在乳剂层中，除了卤化银和明胶外，根据不同要求还加入某些补加剂，以改善乳剂的某些性能。它们主要是：增感剂、坚膜剂、稳定剂、防腐剂等。

1. 增感剂 增感作用，就是增加乳剂的感光性。增感作用分化学增感作用和光学增感作用[①]。光学增感作用的目的是在于扩大乳剂光谱感光范围（图 1-2 中的曲线Ⅱ），化学增感不改变乳剂的感光光谱范围，只是使感光度增加（图 1-2 中的曲线Ⅰ）。

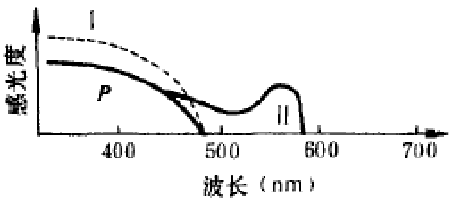


图 1-2 溴化银的增感

（1）光学增感剂。感光材料的光谱感光性，是由卤化银所能吸收的光谱成分来决定的。它吸收的光谱范围大致为 200～500nm。氯化银几乎是无色的，仅感受紫光及紫外辐射，它能感受的最长波长为 410nm。溴化银呈浅黄色，感光区域达到 490 纳米。碘化银呈现较深的黄色，它的感光区域能够达到 540nm[②]（参见图 1-3）。乳剂在 500nm 以外光谱区域的感光性决定于卤化银颗粒中的杂质。使用某些染料作为光学增感剂可以显著地扩大光谱感光性，甚至达到红外区域。增感剂加入乳剂后，被卤化银强烈地吸附着。曝光时染料分子能够吸收卤化银所不能吸收的波长大于 500nm 的光能。吸收了光能量的染料分子处于激发状态，这种活化分子很快便将它所吸收的光能传递给卤化银，增加了卤化银的分解作用，因而能起提高乳剂感光性能的作用。

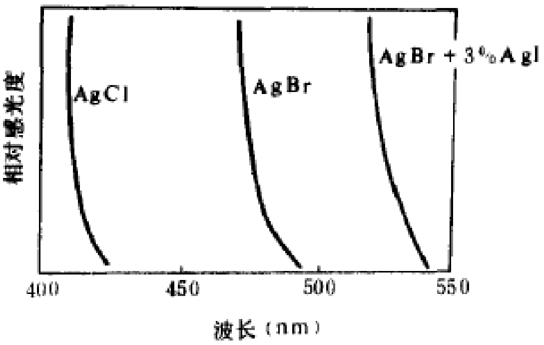


图 1-3 几种卤化银的光谱感光特性

作为光学增感剂的染料，主要是菁染料。表 1-1 列举用作增感剂的几种国产染料。

根据增感后的感光范围，感光材料可以分成盲色片（或色盲片）、正色片、全色片和红外片等。图 1-4 中举例说明各类感光材料的光谱感光范围。

---

① 光学增感也叫光谱增感或分光增感。

② 不同研究者的测定值参见参考文献[3]p.45 表 3.10。

表 1-1　几种用作增感剂的国产染料

增感剂名称	增感剂颜色	增感色光	用　途
增感染料 1555	红色	绿、黄	黑白正片乳剂
增感染料 798	蓝紫色	绿、黄、橙、红	黑白全色乳剂
增感染料 340	亮红色	绿	彩色片感绿层
增感染料 1833	黄绿色	橙、红	彩色片感红层

黑白相纸复制的是黑白底片上的黑白色调，不需要光学增感，这就是为什么暗室中印像时可在红灯或绿灯下操作的原因。

(2) 化学增感剂。感光乳剂的制造，大致要经过以下几个技术过程：配液、乳化、物理成熟、冷凝、切条、水洗、化学成熟、再次冷凝切块储藏或涂布等。乳剂的制备过程实际上是将卤化银微晶体均匀地分布在明胶里并获得一定感光性能的过程。

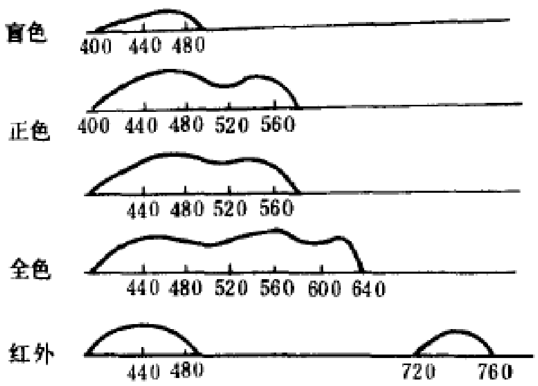


图 1-4　几种感光材料的光谱感光范围
图中各曲线的横坐标为以纳米为单位的波长，纵坐标为相对感光度

通常把硝酸银溶液和碱金属卤化物明胶溶液混合生成卤化银明胶乳状液的过程称做乳化。乳化在装有搅拌器的不锈钢锅中进行。乳化过程是卤化银微晶体开始形成阶段。乳化结束后，还需要把混合溶液在较高温度下继续搅拌一段时间，使卤化银小颗粒成长为大颗粒。这个颗粒成长过程显然是物理过程，故称为物理成熟。又由于这一过程先于化学成熟，因此也称为第一次成熟或前成熟。物理成熟使卤化银颗粒达到所需要的颗粒大小和分布状况，而化学成熟是在卤化银颗粒上形成金属银和硫化银小质点，使颗粒产生局部变化，从而达到所要求的感光性能。两次成熟之间的水洗过程的目的是为了除去乳剂中过剩的溴化钾、硝酸钾和氨。这些物质在物理成熟过程中曾起溶剂作用。物理成熟一旦结束，这些物质就是多余的了，否则物理成熟过程将继续进行。同时多余的溴化钾将严重阻止化学成熟，硝酸钾由于其吸潮作用使干燥后的乳剂层发生粘连，氨会使乳剂层产生灰雾。乳剂在完成物理成熟之后，要在低温下迅速冷凝。冷凝的目的一方面可尽快终止物理成熟，另一方面使乳剂具备一定强度，以便切成小条进行水洗。

化学成熟也称第二次成熟或后成熟。前面已经谈过，晶体结构上无缺陷或位错的卤化银颗粒对光几乎不敏感。化学成熟过程，就是通过加入某种物质使卤化银颗粒的晶格结构受到破坏，产生更多的感光中心，这是集中在颗料表面的一些硫化银或胶态银微粒组成的微斑。微斑集结的银原子愈多，感光中心就愈大。感光中心大，只要接受少量的光能量，就可以扩大到足以显影的程度，也就是说乳剂感光快。明胶能够吸附银离子生成络合物并进一步还原析出金属银。同时明胶中还含有少量硫化物的杂质，化学成熟时能与银离子生成硫化银，起到增感作用。除此之外，还可以加入专门的化学增感剂来提高乳剂的感光度。常用的有：硫代硫酸钠或其它含硫物质（用以生成硫化银）或是如亚硫酸钠、氯化亚锡一类的还原剂（用以将卤化银还原出银离子），也可加入少量金的化合物，如硫氰酸金，使卤化银晶体表面形成微量的金属金作为感光中心，感光度可提高 3～4 倍，细颗粒乳剂的感光度可以提高 10 倍以上。

化学增感必须适度，增感过度会形成严重的灰雾，过大的感光中心称灰雾中心。

2. 坚膜剂　乳剂层中的明胶在水中具有较高的膨胀度，膨胀后的乳剂层对机械作用和热非常敏感，常易造成机械损伤、粘连和影像变形。为了防止这些弊病，涂布前在乳剂中加入坚膜剂，以缩小乳剂膜在水中的膨胀度，提高乳剂膜的熔点和机械强度。常用的坚膜剂中，无机的有铬、铝、锆金属盐，用得较普遍的是铬矾，有机的有醛类（如甲醛、乙二醛）、酮类（如丁二酮）和高分子化合物（如聚丙烯醛）。

3. 稳定剂　又称抗灰雾剂，常使用溴化钾或三氮茚。它们的功用是防止灰雾的产生和延长乳剂使用期限。

4. 防腐剂　在乳剂制备过程中和感光材料保存期间，乳剂层极易被微生物腐蚀，因为乳剂层中的潮湿明胶是细菌和霉菌良好的培养剂。为避免这种霉腐现象，须往乳剂中加入防腐剂。常用的防腐剂有苯酚（石碳酸）、对氯间甲酚和麝香草酚（百里酚）等。

5. 其它　除了以上的补加剂外，根据感光材料的不同用途还选用其它补加剂，如：增塑剂（用于防止乳剂膜层过份干燥而发脆，常用的增塑剂是甘油），防氧化剂（用于防止增感染料被空气等氧化而失去增感作用，常用的有邻苯二酚、1－萘酚和 2－萘酚），消泡剂（用于消除乳剂涂布时的泡沫在感光膜上产生气泡，常用的有乙醇或丁醇），防斑点剂（用于消除铁离子一类的金属离子的存在，以免使感光度下降或灰雾上升，常用的有乙二胺四乙酸二钠盐和曲酸等，它们能与金属离子形成络合物），表面活性剂（用于降低乳剂表面张力，提高涂布质量，常用的如二异丁基－β－萘磺酸钠盐等），紫外线吸收剂（用于防止彩色画面褪色，防护染料影像在紫外线辐射下不受破坏，常用的有杂环类化合物、芳香类化合物等），以及消除乳剂层表面光泽的消光剂，提高银颗粒遮盖本领的遮盖力剂等等。

1-1.2　片基

片基是感光层的依托。乳剂在用来摄影以前，先涂布在适当的支持体上，由它使乳剂层保持一定的形状。相纸的乳剂支持物是硫酸钡底纸基。这种纸有下列特点：颜色洁白、水浸后不变形、干燥后不起皱、有足够的强度。干板是用无色透明的平板玻璃作为乳剂层的支持体。胶片则用无色透明薄膜作为片基，目前广泛使用的有纤维素酯和合成高分子聚合物两大类。属于纤维素酯类的有硝酸纤维素和醋酸纤维素，属于合成高分子聚合物类的有聚对苯二甲酸乙二醇酯（即涤纶）、聚苯乙烯、聚碳酸酯等。

硝酸纤维素酯片基由于易燃，从本世纪 40 年代即已被安全的三醋酸纤维素酯片基所替代。醋酸片基是目前使用最广泛的片基材料，但它有脆性较高、不耐寒、磨损较快以及显影加工中产生收缩现象等缺点。涤纶片基又称聚酯片基具有熔点高、热稳定性好、弹性高、吸湿性小、收缩性低、平整度好、化学稳定性好以及透明度好等特点。它可以制得很薄，适合于高空、低温、高速等特殊条件下使用。目前这种片基还存在着不易粘接、静电过大等缺点。聚碳酸酯片基是由聚碳酸酯树脂制成。它具有良好的耐低温性能，并具有优良的耐热性和尺寸稳定性，但透明性和耐撕性能稍次于涤纶片基。这是一种很有发展前途的新型片基。聚苯乙烯片基是由聚苯乙烯树脂加工制成，具有吸水性小、吸湿膨胀和热膨胀小的优点，在冲洗加工过程中变形极微，所以常用作制造印刷制版、天文及测绘胶片的片基，以代替干板的玻璃片，但耐冲击强度较差。

片基的厚度直接关系到片基的透光度，折光率、机械强度和耐折次数。三醋酸纤维素酯片基的厚度在 0.10～0.20mm 之间，聚酯片基在 0.05～0.175mm 之间。

表 1-2 举例说明三种片基机械性能以及几何尺寸稳定性能的比较。

表 1-2　三种片基的性能比较

	三醋酸纤维素酯片基	涤纶片基	聚碳酸酯片基
抗张强度(kg/mm^2)	13.2	20.0	17.5
断裂延伸率(%)	30	140	122
弹性模数($10^{-5}N/cm^2$)	4.0×10^{10}	3×10^{10}	2×10^{10}
冲击强度($kg\cdot cm/cm^2$)	30	290	82
耐折次数(厚度 0.145mm)	36	15000	>150
吸湿膨胀系数(cm/cm/°C)	30×10^{-5}	0.18×10^{-5}	0.4×10^{-5}
热膨胀系数(cm/cm/°C)	$10\sim15\times10^{-5}$	2.7×10^{-5}	7×10^{-5}
吸水量(%)	6	<0.5	0.3
热变形温度(°C)	150	150	165
抗寒性(°C)	$-30\sim-40$	-60	-135

1-1.3　附加层

无论是纤维素酯片基还是聚酯片基，为达到制造各种感光材料的要求，均需在成型的薄膜上涂布附加层。附加层包括保护层、底层、防光晕层、防静电层等。

一、保护层

为了保护乳剂不受机械损伤，制作感光材料时，常在乳剂层表面涂有一层很薄(约 1～2μm)的明胶层，称为保护层。照相纸的保护层，经上光处理后，还可出现光泽，使照片鲜明美观。

二、底层

片基的表面是憎水性的，不能与亲水的乳剂层很好地粘接，涂底层的目的就是使乳剂层能牢固地粘附在片基上，防止在涂布乳剂和显影加工时乳剂层从片基上脱落。底层有两种类型，一种是胶底层，厚度约为 1μm 左右，胶底层的成分有明胶、水、有机溶剂、有机稀释剂和酸类，其中明胶作为成膜物质是基本成分；另一种是高分子树脂底层。醋酸纤维素酯片基也多已采用树脂底层代替明胶底层。相纸的底层是明胶加硫酸钡，所以又叫钡底层。钡底层除了有使乳剂与纸基粘合牢固的功用外，还有防止乳剂渗入纸质内和增加纸基反射能力等作用。

三、背面层

涂背面层(或称假漆层)的目的是防止片基产生静电、防止产生光晕或防止卷曲。具体起什么作用，要看背面层中加有什么物质来决定。

1. 防静电层　纤维素酯和聚酯都是高绝缘物质，乳剂层中的明胶也是绝缘体，这种绝缘体很易带电，而且很难自行导失。静电积累多了，就会引起放电。放电会引起感光材料感光，经显影后产生树枝状或绒毛状的斑痕，使胶片失去使用价值。即使胶片表面上的电荷达不到放电程度，由于电荷的存在能吸引尘埃等不洁物质，导致胶片产生其它弊病。因此，必须在片基背面涂

一层防静电物质，增强胶片的导电能力，使静电一经产生便在极短时间里散逸。常用的防静电物质有吸湿性物质（甘油、硝酸钾等）、离子型物质（烷基胺盐、季胺化合物等）以及高分子化合物（聚苯乙烯、甲基丙烯酸酯）等。

2. 防光晕层 感光材料在曝光时常产生光晕和光渗现象。当拍摄光源等亮度高的物体时，由于卤化银晶体对光的散射作用，使得影像附近不该感光的部分也感了光，以致影像模糊，这种现象叫光渗现象，也叫做本身光晕。此外，有一部分光线通过乳剂，在片基面上反射，使影像周围也感了光，例如拍摄点状光源时，影像除了本身轮廓模糊外，还在周围产生了一个圆环。这种现象叫反射光晕。

光渗现象由乳剂中加入一定的染料吸收那些散射光线来防止。防止反射光晕最常用的方法则是将防光晕假漆涂于片基的背面或片基与乳剂层之间，用以吸收乳剂能感光的反射色光。根据乳剂的感色性不同，防光晕层的颜色也不同，通常正色片涂红色，全色片涂绿色、黑色或灰色，彩色片涂绿色或黑色。防光晕层的颜色在显影液作用下即可消除。

3. 防卷曲层 涂在片基背面的防光晕层和防静电层，还能起到防卷曲的作用，因为它们的基本成分是明胶。这样，片基两面都涂有明胶层，膨胀率相等，从而能够防止胶片的卷曲。

§1-2 摄影过程及其机理

我们所熟悉的摄影全过程，大致可表示成如图1-5中的方块图。它由负片过程和正片过程两个相对独立的阶段组成，前者由胶片得到底片，后者则由底片复制得到照片。每一个阶段又

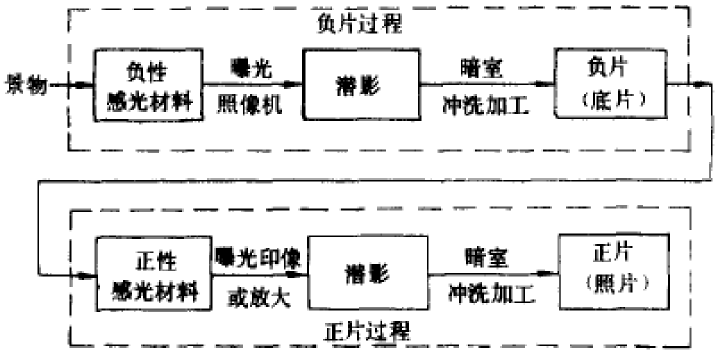


图1-5 摄影过程方块图

均可由基本相类似的曝光和暗室冲洗加工处理两个先后相继的段落组成。摄影曝光过程获得看不见的潜影（潜像），摄影加工过程则将看不见的潜影转变成为稳定的可见影像。

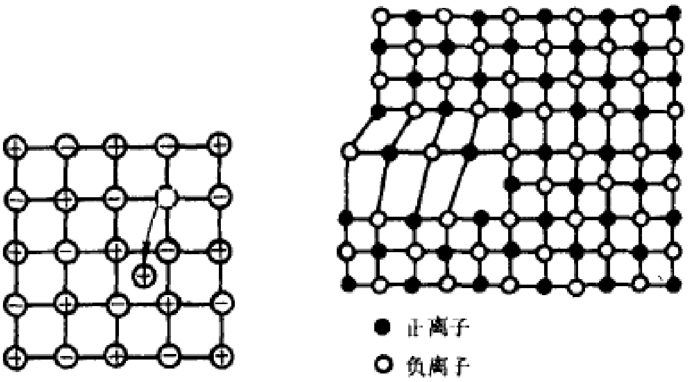
1-2.1 摄影曝光过程

前面我们已经谈到，卤化银晶体的不完整性破坏了理想晶体结构的固有平衡，造成晶体结构的薄弱环节，而正是这些薄弱环节才使卤化银具有感光性能。

卤化银晶体的不完整性通常可分为两类：一类属于物理上的不完整性；另一类是化学上的不纯洁性。物理上的不完整性，指晶格的缺陷和偏离。例如在热平衡运动下，点阵中的基本质点（离子）往往会离开应有的位置进入离子间的空隙（这种离子称格间离子），而使自己原来的位置成为空穴（图1-6，*a*）。产生格间离子和空穴的现象称为点阵缺陷。如果在点阵正常位置上，基本质点发生移动而使点阵偏离或歪曲，因而使质点间的距离发生改变，这种现象则称为

点阵位错(图 1-6,b)。

在理想晶体内部电荷是平衡的,所有的离子都被带相反电荷的离子群围绕着。对于不完整的晶体来说,在晶体点阵缺陷和位错部位如若失掉一个离子,便意味着其原来位置周围的六个离子带有与失掉的离子相反的电荷,因而能够吸引带相反极性电荷的质点。在照相乳剂制备过程中,明胶中的微量杂质和化学成熟时加入的增感剂,都可使卤化银离析出微量的银或硫化银,这些微量的银质点或硫和银的络合物极易集中在卤化银晶体的缺陷和位错部位,形成所谓感光中心。感光中心就能量来说就像是一个陷阱,自由电子一到那里就会陷落并牢固地停留在那里。



(a) 点阵缺陷　　(b) 点阵位错

图 1-6　卤化银晶体的不完整性

感光层曝光时,光能为 $h\nu$ 的量子(光子)作用于卤化银晶体上,卤离子首先吸收了光量子,释放出一个自由电子后变成了卤原子:

$$Br^- + h\nu \rightarrow Br + e$$

卤原子组成卤分子后离开晶体被明胶吸收,自由电子则迅速移向感光中心并固定下来。这样,感光中心便成了吸附很多电子的带电体,结果形成一个负电场。在晶体内的格间银离子,在电场力的作用下被引向电场。这时银离子反过来俘获聚集在感光中心的电子,结果还原成金属银原子:

$$Ag^+ + e \rightarrow Ag$$

还原后的金属银原子也被固定在该感光中心上,从而使感光中心扩大。扩大了的感光中心又能有效地捕获随后光解出来的电子。这样,随着曝光中不断吸收光量子所释放出的电子被捕获,感光中心就不断地生长扩大。当感光中心扩大到一定程度时,便达到了可显影的阶段,这时,扩大了的感光中心便称为显影中心。这些显影中心便是构成潜影的潜影核。潜影和显影中心的区别在于,潜影是由若干银的质点组成的不可见的影像,而显影中心则是指卤化银在显影时起中心作用的各个银的质点。潜影是由无数显影中心构成的。这种潜影可以通过进一步化学处理的方法,使它变成可见的影像,这就是曝光后感光材料的显影加工过程。经过显影加工,显影剂使感光后已发生部分分解的卤化银颗粒进一步分解,从而使整个颗粒全部或大部还原成黑色的金属银,这样潜影才能变成可见的影像。

需要指出的是,已经形成的潜影,如不及时显影加工,在放置期间可产生逆反应

$$Ag + Br \rightarrow Ag^+ + Br^-$$

这是因为比起 Ag 和 Br 原子来,Ag^+ 和 Br^- 离子因游离能量小而更为稳定。这种反应称为退化现象。组成潜影的银会逐渐减少乃至几乎完全消失。这就是为什么从曝光到显影的间隔时间较长时,显影速度减慢并且影像发虚的原因。退化现象与温度和湿度条件有关,温度、湿度愈高,衰退愈快。

1-2.2 摄影加工过程

感光材料在曝光之后产生了看不见的潜影，只有经过显影加工才能获得可见的影像。显影过程就是将已曝光的卤化银还原成金属银的过程，所用试剂称为显影剂。在显影过程中，只有部分卤化银被还原成金属银，构成黑色影像。剩余的未被显影的卤化银在见光之后还会发生变化，因此显影并通过水洗或停显(终止显影)以后，还需把未还原的具有曝光能力的卤化银溶出，使已生成的影像得以固定，这一过程叫定影，所用的试剂叫定影剂。最后还需经过水洗，把感光材料上残存的定影剂洗掉，以保证所得影像能够持久保存。

一、显影

如前所述，潜影的本质是银，显影就是扩大潜影部分的银量。根据扩大银量方法的不同，有两种显影的方法，即化学显影法和物理显影法。

化学显影就是利用显影剂使乳剂层中原有的卤化银还原成为金属银，从而使潜影扩大成为可见影像。这种显影方法所得到的银粒结构是纤维状的。通常所讨论的显影都是指化学显影。化学显影操作简单、经济、故被广泛采用。

物理显影中形成可见影像的银，不是来源于乳剂层中原有的卤化银，而是来自外加在显影液中的可溶性银盐。曝过光的感光材料在物理显影过程中先要将乳剂内的卤化银溶去，只剩下显影中心(相当于先定影)。显影液中的银盐所产生的银离子接触显影中心后，在显影中心的催化作用下，很快被显影剂还原成金属银并沉积在潜影上，逐渐形成可见影像。潜影的这种沉积扩大过程是一种物理变化，因之将这种显影过程称为物理显影。由于显影中心均匀地向四周扩大，所以显影所得的银粒的结构不是纤维状，而是一个坚实的集团。物理显影法所得到的影像层次丰富，银粒细腻，适合于高倍放大。但由于操作复杂，用来显影的感光片需要加长曝光时间，所以除了供科学研究及特殊用途外，一般不采用这种显影方法。我们以后也不再讨论它。

化学显影的显影液一般含有四种主要成份，即，显影剂、促进剂、保护剂和抑制剂。

显影剂是一种还原剂。作为显影剂的还原剂必须满足一系列特殊的要求，如：对已曝光的卤化银比对未曝光的卤化银还原得快(未曝光颗粒的还原，形成有害的摄影灰雾)，还原的速度适中，有良好的溶解性，不对胶片染色，无毒等。目前应用比较广泛的是有机物显影剂，如米吐尔、对苯二酚和菲尼酮等。

促进剂是一种可提高显影液中 pH 值的碱类物质，例如碳酸钠和硼酸钠，它的作用是为显影剂创造发挥还原作用的条件，从而加速显影过程。

保护剂用以防止显影剂被氧化。在水溶液中的显影剂很容易被氧化，不仅失去显影能力，而且污染乳剂层。常采用的保护剂是亚硫酸钠。

抑制剂的主要目的是排斥显影剂对未曝光卤化银的还原作用，从而防止灰雾产生。常用的抑制剂有溴化钾和有机化合物中的苯并三唑等。

显影过程主要受药液浓度以及时间、温度和搅拌等条件的影响。

在显影过程中随着显影时间的延长，影像的光学密度和反差[①]都将随之提高。但如果显影时间过长，则会使灰雾增长，颗粒变粗大，反而使反差降低。影像的最大密度值取决于感光材料

---

① 参见§1-7。

本身的性质，当显影达到最大密度值时，就不再随显影时间的增长而继续增加。有些曝光不足的胶片，可以用延长显影时间的办法来补偿，其效果相当于用延长显影时间来提高胶片的感光度。当然这是有限度的，达到极限值时，再延长显影时间也是毫无作用的。

为得到相同的显影效果，显影温度愈高，则显影时间愈短。在实际操作中，通常采用固定温度（一般控制在18℃～20℃）而调节显影时间。这是由于显影温度过高时，不但显影速度加快，不易控制，而且乳剂层会过度膨胀，在操作中容易造成擦伤、划伤等弊病。另外，显影剂在高温下易被氧化。

在显影过程中还需不断搅动，使参加反应后已失去效力的旧显影液及时为新显影液所代替。如不搅动，显影时产生的溴化物无法很快扩散，显影液中的不溶物质易沉淀于乳剂上，阻碍卤化银与显影剂的接触，导致显影作用缓慢和显影不均匀等弊病。另外，由于受强光部分显影剂消耗大，因此显影时若不搅动，强光部分就得不到充分的显影，致使影像反差降低。

二、停显

在显影之后，需将胶片用洁净流动的水冲洗20～30秒钟，或放在停显液中漂洗，以便停止显影过程。常用的停显液多为弱酸溶液，例如醋酸溶液。

三、定影

定影的作用是溶去没有感光的卤化银。在定影过程中，定影液从明胶小孔渗入乳剂层内部，其中的定影剂与卤化银发生反应，生成一种可溶性的络盐溶解于定影液中。定影液中除了定影剂（最常用的定影剂是硫代硫酸钠，俗称大苏打，也叫海波）以外，还加有保护剂、坚膜剂等组分。定影过程是否完成（即定透与否）以溶解掉感光材料中全部剩余的卤化银为标准，完成这一化学反应过程所需的条件仍是时间、温度、浓度和搅动等。定影速度通常用定透时间来表示，定透时间又决定于乳剂的成分、卤化银颗粒的大小、涂布层的厚度、定影液的浓度、定影温度、搅拌状况，以及定影剂的耗损程度等。定影温度一般掌握在16℃～24℃。

四、水洗

在完成定影过程的乳剂层表面和内部都残留着硫代硫酸钠和少量的银络合物。如果不把它们清除掉，它们便会同组成影像的银颗粒起反应，生成棕黄色的硫化银，使影像变黄褪色。因此水洗必须充分，一般在流动水中洗涤30分钟以上。对于珍贵的，需要长期保存的照片，最好定影15～30分钟之后再用3%的过氧化氢和3%的氨水处理5～6分钟，处理后再水洗10～20分钟。这样既可清除银络合物，又可使残余的硫代硫酸钠变成对影像无害的硫酸钠和硫酸铵。水洗温度不宜过高，一般以在14℃～24℃之间为宜。

五、干燥

底片或相片经过水洗以后，须放在空气流通而且清洁的地方或者专门的干燥架上晾干。晾干前，应用易吸收水的柔软体（如海棉、泡沫塑料或毛巾等）将片上的水滴吸去，以免在底片或相片上产生水渍，同时也可避免由于不均匀干燥造成底片或相片局部变形。

六、反转冲洗

胶片曝光后直接获得正像的冲洗方法叫反转冲洗法，所使用的胶片称为反转片。

反转冲洗的原理很简单。在将曝过光的胶片经显影处理后并不进行定影，而是用化学药品将已显出的金属银负像溶解掉(所用药液应当不能影响任何未曝光的卤化银)，这个步骤叫做漂白。漂白液大都采用酸性的高锰酸钾或重铬酸钾的硫酸溶液，它们可将金属银氧化生成可溶于水的硫酸银。于是胶片中剩下的卤化银实际相当于构成了一个正像的“潜影”。将漂白后的感光材料进行第二次均匀曝光，使剩下的卤化银全部感光。然后再进行第二次显影，一般说来，剩余的卤化银将全部被还原成金属银。但为了溶去可能还有剩余的卤化银，第二次显影后，还需进行定影。

在反转冲洗时，第一次显影要用强力的显影液，其目的在于缩短显影时间，并使强光部分充分显影，以保证影像的亮部得到必要的透明度。

从原理上来说，任何一种感光材料都可进行反转处理，但是使用专门的反转片获得的效果最好。反转片的照相特性介于正片与负片之间。由于它是用来拍摄的，因此，对感光度的要求和负片相同。又由于它是直接用来观察或投影放映的，为了保持影像的影调与原来景物一致，因此，它的反差系数较负片要高(一般应略大于 1)，宽容度也随之变窄，另外，用反转片直接得到正片，以后不再复印，没有补正的可能，所以使用反转片拍照时曝光要特别注意。

从结构上来说(参见图 1-1)，反转片的黑色防光晕层一般涂在乳剂层与片基之间，只能在漂白过程中漂除，而不能为一般显影液或定影液去掉，因此，这种黑白反转片不能当作负性材料使用。

§1-3 彩色摄影

我们看到的周围世界不仅明暗交织，而且绚丽多彩。在人们认识客观世界时，颜色常常是识别一种事物的首选特征。颜色的细微变化往往可以带给我们重要的信息，例如可以判定一片树叶是否健康、一块土壤是否肥沃、一个苹果是否甘甜等等。颜色不但能使人们得到美的感受，还能引发人们对暖、冷等其它感觉乃至爱、憎、恐惧等不同的感情。

如上一节所述，黑白感光材料的乳剂在摄影过程中形成的可见影像是由卤化银还原成的金属银的颗粒组成的。这种由细微的银粒构成的影像(也叫银影)是黑色的。单位面积乳剂内聚集的银粒数目愈多，这部分影像就愈黑；相反，银粒愈稀疏，影像的黑度就愈浅。因此，黑白影像只能以黑白深浅程度的差别来表现景物各部分亮暗的不同，而不能再现斑斓的色彩。

彩色摄影依据人类的颜色视觉的规律，采用彩色感光材料和显影加工过程来得到彩色影像，能够更加逼真地再现五颜六色的景物，为人们记录和保存更多维量的信息。

1-3.1 视觉三色理论

彩色摄影的基础是视觉三色理论。视觉三色理论也叫做三感受器理论，最初是由杨(Young)在 1807 年提出三原色的假设，后来赫姆霍兹(Helmholtz)在 1860 年进一步提出人的眼睛里有三种基本的颜色视觉感受器的假说。近代生理学的研究已经证实，在人眼睛的视网膜上，存在着两类视觉神经细胞：锥状细胞和杆状细胞。杆状细胞对光的感受很灵敏，但没有分辨颜色的本领；锥状细胞对光的感受较不灵敏，但可以由它来分辨颜色。在微弱的光线下，锥状细胞几乎失去活动能力，这时的视觉主要靠杆状细胞，称为暗视觉。暗视觉条件下我们所看到的周围物体失去了它平日的色彩，只有黑、灰、白的差别，就是因为杆状细胞只能分辨明暗，不能

分辨颜色。在外界光线达到一定的强度时，杆细胞含有的紫红色素分解，失去了吸收光子的能力，而锥状细胞含有的色素则能够吸收光子而产生生物化学和物理的复杂变化，触发神经冲动，将视觉信息通过视神经纤维传至大脑皮层的视觉中枢。主要靠锥状细胞的视觉称为明视觉，或白昼视觉。

用显微光谱光度学的方法研究人和灵长目动物的锥体感受器的结果证明，确实存在三种不同的锥状细胞色素。这三种色素对光子的吸收各有不同的光谱选择性，也就是说它们对不同波长的光有不同的感受灵敏度（图 1-7）。由图可见，三种锥状细胞感受灵敏度的峰值分别位于短波（440～450nm）、中波（530～540nm）和长波（560～570nm）处，故分别称为 S、M 和 L 锥体细胞。同时由图也可看到，这三条灵敏度曲线并不是互相分离的，而是彼此有相当大的重叠部分，因此，在绝大部分可见光谱内，任何波长的光都至少能被二种锥状细胞色素吸收。当三种锥状细胞被刺激的程度是一样的时候，我们的视觉所感觉到的便是白色（当刺激较强时）、灰色（刺激较弱时）、或黑色（刺激极弱时）。当三种细胞所受刺激不同时，就产生不同彩色的感觉。人们常把白、灰和黑叫做非彩色或消色，其实就眼睛细胞受刺激的实质来说，它们与彩色是完全没有区别的，因此消色这个名词看来并不科学。非彩色和彩色都是我们感觉到的颜色。

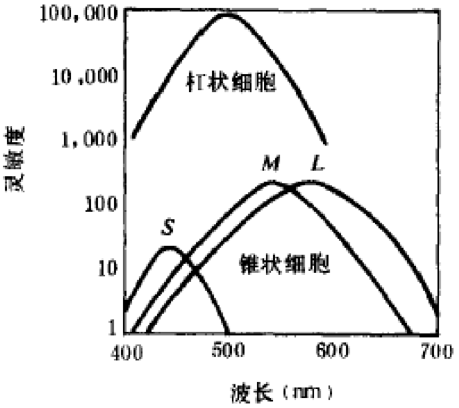


图 1-7 人眼杆状细胞和三种锥状细胞的相对灵敏度

与人眼视觉神经细胞结构相一致的视觉三色理论认为：在某些限定条件下①，任何颜色均可由红、绿、蓝三种颜色的适当组合来匹配。这三种颜色叫做原色（或基色）。有的书上认为更确切的叫法应该是参考色，因为选择哪三种波长的单色光② 作为配色的基础本来可以是随意的，只要这三种单色光满足这样一个条件：即其中任意二种均不可能以任何比例组合成与第三种相匹配的颜色来。国际照明委员会（CIE）推荐三原色的波长③，只是为了建立一个国际统一的便于比较的标准。

三原色等能量的组合可以得到白色、灰色或黑色。两种原色的组合得到的颜色叫做间色（中间色）。显而易见，间色和第三种原色相组合也可得到白色。这样两种可以组合成白色的颜色我们称它们为互为补色。例如红色加绿色得到黄色，黄色便是红、绿的间色④。黄色加蓝色可

---

① 并不是一切颜色均可由三种原色组合匹配的，有的颜色只有允许引入负的原色组分，也就是说采用从二种原色的组合中减去一定组分的第三种原色的办法，才有可能与之匹配。这个问题的详细讨论，可参阅色度学的书籍。

② 人们习惯上把只含单一波长的光叫做单色光，把能够引起红色、黄色、绿色等颜色感觉的光分别叫做红（色）光、黄（色）光、绿（色）光等。应当指出，不应把“色光”这个词误解为光本身具有某种颜色，而应当理解为能引起某种颜色感觉的光。光本身是没有颜色的，颜色既不是光的属性，也不是物的属性。颜色是人的视觉器官受到电磁辐射中可见光的刺激所产生的一种感觉，它是外界的物理刺激与人的视觉神经系统相互作用的结果。颜色视觉既来源于外界的物理刺激，又与人的神经活动的生理和心理过程有关，因此它不完全符合物理刺激的性质。例如我们下面将要讨论的颜色混合中的同色异谱现象，即光谱成份不同的光可能引起相同的颜色感觉；又如同一个光斑或物体表面的颜色会由于它周围背景的颜色或先前观察的颜色而改变，即所谓同时颜色对比或相继颜色对比现象，都说明我们的颜色视觉与光刺激的物理性质既有联系又有区别。本书沿用“色光”这个词，一方面叙述比较简便，另一方面在讨论颜色混合问题时，可以避免赘述引起某种颜色的光究竟包含什么光谱成份。因为颜色混合的一个重要原则是：只要外貌上是相同的颜色，不管它们原来组合的成分是什么，在视觉系统上产生的效应都是相同的。

③ CIE 推荐的三原色的波长为 700nm（红），546.1nm（绿）和 435.8nm（蓝）。

④ 需要注意的是，这里指的是色感觉和一定波长的黄光相同，而不是说用一定波长的红光和蓝光相加可以得到另一波长的黄光。这种相同色感觉而不同光波性质的颜色现象叫同色异谱。

以得到白色，因此黄色和蓝色便是互为补色(参看封二彩色附图1)。

于是我们可以看到，彩色可以通过两种途径得到：一种是将不同颜色的光对眼细胞的刺激叠加起来(叫加色法)，一种是从白光中减去相当于补色的部分，使需要颜色的色光刺激眼的视觉细胞(叫减色法)。白色屏幕可以反射任何色光，当我们将红、绿、蓝三束原色的光打到白色屏幕上，反射的光色就是这三束原色光的叠加。改变三者的比例，我们就可以看到它们合成结果的颜色。白光透过颜色玻璃，譬如说红色玻璃，便变成了红色的光，这是因为玻璃吸收或反射掉了它的补色的光。如果将三原色的三块玻璃叠加起来，便将吸收掉全部白光，变成不透明的黑色。用现代多层彩色感光材料的彩色摄影便是采用了这种减色的方法。

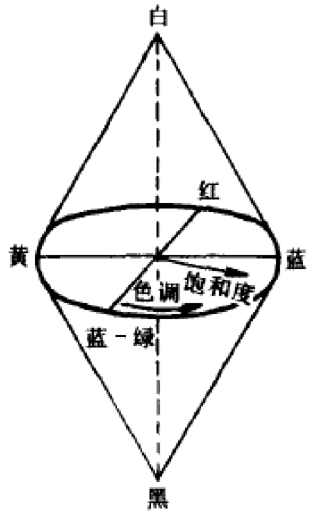


图1-8 色立体

在明视觉(主要由锥状细胞起作用)条件下，人眼所能分辨的颜色是十分丰富的。通常颜色可用色调、明度和饱和度这样三种符合颜色心理的特性来描述它们。以这三个特性为三维画成的色立体如图1-8所示。明度沿竖轴方向测量，中间的竖轴包括了从黑经灰到白的全部非彩色颜色。色调沿绕竖轴的任一圆周测量，每一对补色分别处于非彩色轴的相对两侧。饱和度则由中心向圆周测量出的距离表示，它表示颜色中所含彩色成分与非彩色成分的比例，含非彩色成分的比例愈大，则愈靠近竖轴，颜色愈不饱和(呈粉色)。

1-3.2 采用多层彩色感光材料的彩色摄影

用于彩色摄影的多层彩色感光材料有三层乳剂层(参见图1-1)，这三层乳剂层的感光特性各不相同。以一般的彩色负片为例，它的上层感光乳剂是未增感的盲色层，只能感蓝色光，中层感光乳剂是正色层，可以感绿色光和蓝色光，下层感光乳剂是全色层，增感到可以感红色光。为了使蓝光不致对中层和下层乳剂起作用，在上层和中层之间涂有一层黄色的滤色层(黄色是蓝色的补色，所以也称阻蓝层)。黄色滤光层在彩色冲洗过程中将被漂白褪去。因为这些乳剂层的光谱灵敏度(感色性)不同，我们便能够在一张负片的三层乳剂中同时得到三个潜影，分别由不同光谱成分的光所形成。

在这些乳剂层里还分别含有不同的能够生成染料的有机化合物，叫做彩色偶合剂(成色剂)。它们本身是无色的，但在彩色显影时能与彩色显影剂的氧化物偶合成为有色的染料。上层盲色乳剂里所含的偶合剂在彩色显影时能形成黄色染料，中层正色乳剂里的偶合剂能形成品红色染料，下层全色乳剂里的偶合剂则能形成青色染料。这样，当用彩色显影液对已曝光的彩色负片进行显影加工时，感了光的卤化银被显影剂还原成为金属银的同时，被氧化的显影剂与成色剂反应形成染料。于是在三层乳剂层中既形成了三个分层的银影，同时又各伴随一个补色的染料影像。用漂白的方法漂去银影，最后便得到一个彩色负像。彩色附图2(封二)中表示了每层彩色负片的处理过程。

与黑白感光材料相类似，彩色感光材料一般也可分为：彩色负片、彩色正片(以及彩色相纸)和彩色反转片。它们的结构都大同小异，只是为了获得更好的彩色效果，各层乳剂层的排列次序可能有些变化。

彩色反转片的显影加工与黑白片的处理有点类似，在第一次用黑白显影液作显影加工后

也需要将摄影时未曝光的卤化银经过第二次的均匀曝光。不过因为用黑白显影剂显影时只生成黑色的金属银影而不会同时产生彩色染料影像，因此在第一次黑白显影后不需要立刻用漂白液将银影漂白掉，而可以留在第二次均匀曝光并经彩色显影后，与彩色显影中所得到的银影同时一起漂掉。最后便只剩下了彩色的正像。

从上面讨论的用多层彩色感光材料得到彩色影像的原理，我们发现这种摄影原理还可以用作更广泛有效的记录手段。譬如说，在三层乳剂层中如果采用了增感到能感红外辐射的乳剂，那么我们就能够将从被摄景物发射或反射来的人眼看不见的红外辐射表现为某种染料的颜色。彩色感光材料各层乳剂中偶合剂的种类本来是我们可以任意选定的，如果我们不按与所摄景物光谱色相对应的补色来选择，则结果得到的彩色影像将以与实际景物迥异的色调来显现。于是我们得到了一类新的彩色感光材料品种——假彩色感光材料。封三彩色附图 3 形象地表现了真、假彩色拍摄同一景物的不同效果。图(*b*)是一张红外假彩色照片，照片中用红色表现了景物中健康植被所发射出的红外辐射。假彩色摄影在军事上有很重要的用途，它可以揭露伪装和探测发现不可见的目标。

拍摄彩色照片时，必须要考虑光源的光谱成分，以便采用适当的滤光镜来矫正光源的光谱成分，使它适合于所用的彩色摄影材料。为了适应不同的需要，彩色摄影材料一般分日光型和灯光型的。航空摄影时使用的是日光型彩色胶片，它所适用的光源的光谱成分与色温 5000K 相当。因此，为了使光源的色温与彩色航空胶卷的感光特性相适应，彩色航空摄影宜于在晴天少云，太阳高度角大于 20°的情况下进行。因为这时太阳光的色温比较稳定地接近 5000K。

§1-4　一步摄影①

通常的照相过程都是先拍摄成底片，然后通过印像或放大制成照片。一步成像照相则可在拍照后十几秒至几十秒内直接从照相机取出一张照片。美国波拉(Polaroid)公司 1948 年首先试制成功黑白一步成像照相机。这种照相机需要采用特殊感光材料。曝光后在从照相机拉出感光材料的同时，内装的糊状药剂完成显影和把负像转印成正像。取出后将正、负片揭开，便得到一张稳定的照片。波拉法一步摄影机中的正、负片及加工药剂的布置如图 1-9 所示。负片是由卤化银乳剂涂于载体上构成，为了价廉大都采用纸基，也可采用胶片片基。正片(也称接受片)是在纸基上涂上一种透水性的胶体，在这种透水性胶体接受层中并没有感光物质，它是由明胶、碱金属硫化物(例如硫化钠)和金属盐(例如硝酸钴或镍、铅、镉、锡等金属盐)混合组成的胶体溶液涂层。加工药剂是由强显影剂、定影剂和一种粘性成膜物质组成的粘浆，封装在小胶囊内，并在正片药面上按一定距离间隔放置。

负片曝光后与正片一起经过一对滚轴，小胶囊被滚轴挤压破裂，显影和定影药剂就均匀地散布在正片负片之间，显影与影像扩散转移过程随即同时开始。负片上已曝光的卤化银被显影剂还原成金属银而形成负像，未曝光部分的卤化银则同时被定影剂所溶解生成硫代硫酸银络合物并向正片接受层迅速扩散转移。接受层中的硫化物和金属盐与负片中转移来的硫代硫酸盐起作用而生成硫化银和胶态银，这些硫化银和金属银便是正片中的显影中心，也被加工药剂中的显影剂还原得到可见的正像。

正片和负片撕开之后，在正片表面上总残留有一些加工药液，如不加以清除，就会使影像

① 更详细的讨论可参阅[19]，p 259—330。

逐渐发黄褪色。因此，要在分离后的正片上涂一层保护性的树脂状稳定剂，这层稳定剂一方面中和残留的碱，另一方面形成保护影像的薄膜。分离后的负片如需保存，最好再经过一次定影和净化处理，以供以后复制之用。

彩色的一步摄影过程与黑白一步摄影相类似，但从负片扩散转移的是染料。Polaroid 公司的波拉彩色照相机(图 1-10)中采用的是散页的波拉片，每十张装成一个片包。彩色波拉片也由正片和负片两部分组成，中间安置有一个加工药剂小包(位于片子的一端)。与黑白波拉片不同的是拍摄完成后，正片和负片不再分开，而是一个整体构成一张照片。照片的正面是正片的透明片基，照片的背面则是负片的不透明片基。彩色波拉片的正片和负片的结构比黑白片要复杂得多。正片有五层之多，其中包括一层受像层和一层中和层。负片则除三层乳剂层外，每一层乳剂层后还各有一层染料显影剂层，并有隔离层将三组乳剂层—染料显影剂层隔开。染料显影剂层既是组成彩色影像的染料提供者，又是具有显影能力的显影剂。曝光时，光线从正片的片基透过正片一直抵达负片，使负片的感光乳剂感光。当曝光结束后，波拉照相机设计有专门的驱动装置将已曝光的波拉片推出照相机，同时将加工药剂小囊挤破，使加工药剂均匀地散布在正片负片之间。加工药剂中的碱就渗透到负片的各乳剂层和染料显影剂层中，使染料显影剂溶解并成为活动的分子。这时乳剂中已曝光的卤化银便和染料显影剂起显影作用，卤化银被还原，染料显影剂则被氧化。被氧化的染料显影剂便失去溶解性能而固定在乳剂层中，构成彩色负像。未曝光的卤化银不与染料显影剂起作用，所以其上的染料显影剂不受氧化，它保持原有的扩散能力继续扩散，一直通过加工药剂层而达到正片的受像层上。正片中的中和层将扩散来的染料显影剂中的碱性物质中和掉，染料即染在正片的受像层上，形成了一个彩色的正像。通过透明的正片片基观察，就能看到完全是由染料显影剂的颜色组成的彩色影像。由于这个彩色影像完全是靠染料扩散而来的，因此它的清晰度和色彩再现等方面均不如一般的彩色照片。

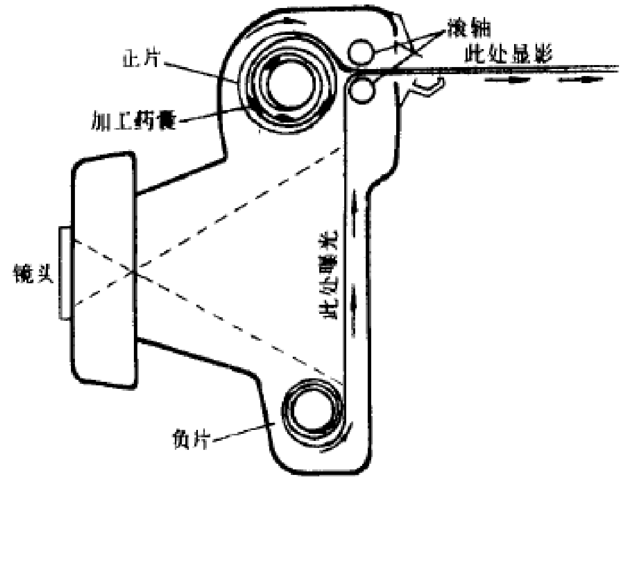


图 1-9　波拉法正、负片及加工药剂的布置

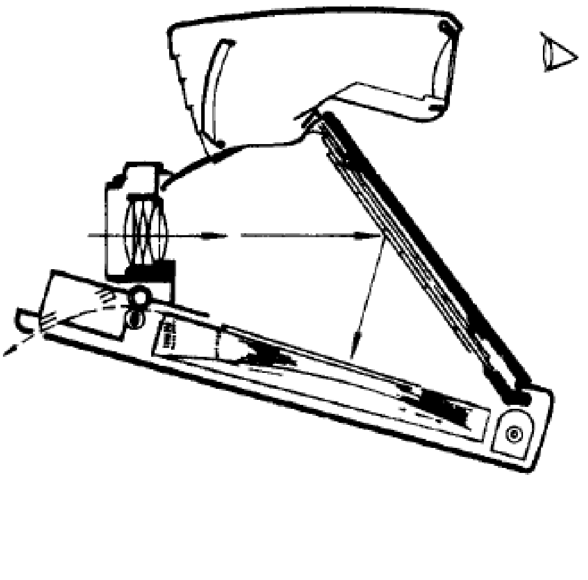


图 1-10　SX－70 波拉照相机结构示意图

§ 1-5　红外摄影和光谱带摄影

1-5.1　红外摄影

利用红外线于摄影，主要基于下列三个特性：(1) 物体对红外线和可见光的反射本领不同；(2) 对混浊大气，红外线有较佳的透过性；(3) 红外辐射的不可见性。

红外摄影，提高了识别伪装的能力。这主要是利用了不同物体对红外线和可见光的反射(和辐射)本领不同(也就是说光谱亮度特性不同)这个特点。

我们举阔叶树林和针叶树林的光谱亮度特性为例来说明。从图 1-11 中可以看到，在光谱的蓝色部分(400～450nm)或橙红色部分(700nm)摄影时，这两种树林彼此几乎没有区别。在光谱的黄绿色部分(550nm)摄影时，它们的差别也不大。所以用普通的黑白片或彩色片拍摄时，它们的色调区别很小。在航空摄影中，由于比例尺很小，又很难从枝叶的细节结构来区分它们。但是，在 760nm 以远，两者的亮度系数相差很大。因此用红外摄影时，就可以看到针叶树林较阔叶树林要浓黑得多。

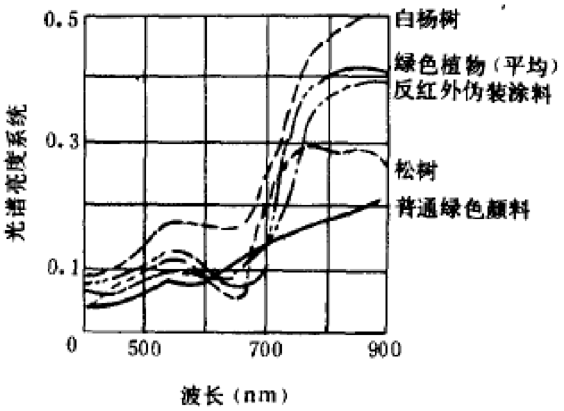


图 1-11　几种植物和涂料的光谱亮度系数曲线

在图 1-11 中，我们还画出了普通绿色涂料的光谱亮度特性，可以看到，它在红外区域的亮度系数很小。被砍伐下来的绿色植物，即使砍伐时间不久，看起来还没有枯萎褪色，它的红外区域的亮度系数也显著地降低。因此，对于这些伪装，用红外摄影可以清晰地将它们从背景中暴露出来。随着科学技术的发展，近些年来，各个国家已经研究出了一些专门反抗红外照相的伪装涂料，它们的光谱反射特性，无论是可见谱段还是红外谱段都和绿色植物的光谱特性极为近似。用这种涂料伪装的目标，在普通照片或红外照片上都很难把它们从绿色植物的背景中识别出来。

利用红外照片所反映的不同目标或细部的不同色调，可更准确详细地判读目标。例如，在红外照片上，由于植物的色调很浅，野战工事、铁路等目标就显得比较清楚；由于水的色调很深，又会使桥梁、码头等目标明显地呈现出来。而在一般的航空照片上，这些目标与背景之间的色调差别不大，不易区分。当然，对于有些目标，红外摄影又会得到相反的效果。例如，水泥工事、公路和机场跑道等色调较浅的目标，在一般航空照片上，从色调较深的绿色植物背景中很易识别，而在红外照片上，却由于绿色植物的红外像色调较浅，反而不易辨认。

红外摄影不但可以揭露不同亮度特性的景物，利用红外线对混浊大气有较佳的透过性(因为红外线的波长较长)这个特点，红外摄影还可减少大气烟雾影响，提高所拍景物的对比。大气中的混浊介质，使光线强烈散射，结果被摄物体来的直射光线减少，同时使背景发亮，造成对比下降。这是限制摄影距离的一个重要因素。但是大气中混浊介质散射光线的强弱与光线的波长有关。一般来说，波长愈短，散射愈强。由于红外线对混浊介质有较佳的透明性，因此它的拍摄距离可较可见光的摄影远得多。它特别适宜于高温高湿度的热带地区摄影和从高空中对地球表面摄影。

利用红外线的不可见性，还可在黑暗中进行摄影。一般夜间航空摄影需要自备极强的人工光源（照相炸弹、照相火箭或强闪光灯），用来照明所摄地面。它带来了一系列的技术难题和限制。拍得照片的张数有限，质量不能保证很好，同时又将执行任务的飞机明显地暴露在敌人眼前。利用红外摄影就排除了这些缺点。

利用红外线摄影，还可以得到特殊的侦察效果。例如在机场的照片上可以摄下刚飞离不久的飞机留下的余热所造成的影像。

红外摄影的原理有多种，和普通摄影相一致的方法是采用红外感光材料。由于胶片性能的限制，这种方法只能用于近红外区（波长为 0.76～1.4μm 左右，常用的为 0.7～0.9μm）。

红外胶片也可分黑白的和彩色的两类。图 1-12 表示几种黑白红外胶片的感光特性曲线。

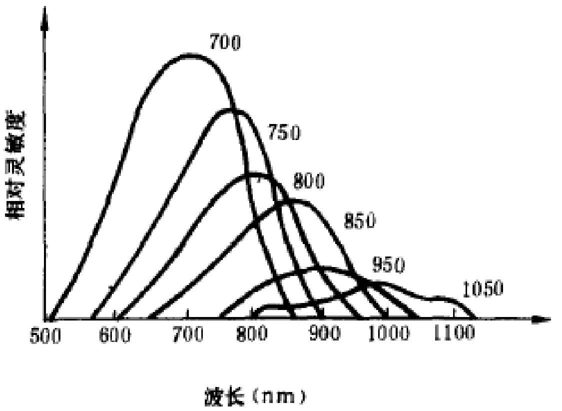


图 1-12　几种黑白红外胶片的感光特性曲线

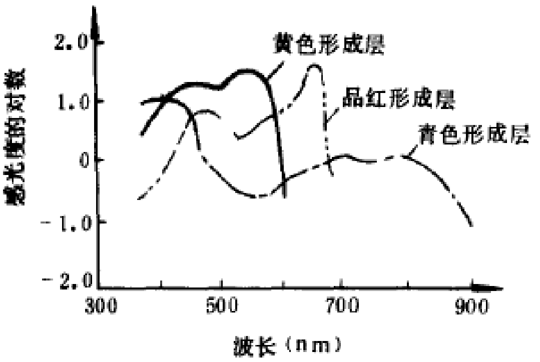


图 1-13　一种彩色红外胶片的感光特性

一般说来，增感区域伸展愈远的胶片，愈难保存。例如，当 0℃时，950nm 胶片可保存几个月，而 1050nm 的只能保存几星期。现代的红外胶片已具有足够的感光度，足以应用于很短的曝光时间，以适应航空摄影的需要。

彩色红外胶片是用可见光中的某种颜色来表现不可见的红外线，所以彩色红外照片的色彩和实际景物并不相符，它就是我们在§1-3 中介绍过的多层假彩色感光材料这种片种，用它拍摄得到的照片叫假彩色照片（见彩色附图 3,b）。

适当选择假彩色的颜色，可以使我们要判读的目标，更加突出地出现在它的背景上。

图 1-13 是一种彩色的红外胶片的特性曲线。这种红外胶片的三层感光层是：红外感光层（产青色染料），感绿光层（产黄色染料），感红光层（产品红色染料）。因为三层感光层均感蓝光，所以用时需戴拦阻蓝光的滤光镜。

除了用红外胶片拍摄外，还可以采用其它的红外摄影方法。图 1-14 表示利用光电转换技术来进行红外摄影的原理示意。光电转换器（变像管）将成在光阴极上不可见的红外辐射像转换成荧光屏上的可见光像，然后用普通的摄影方法记录下来。

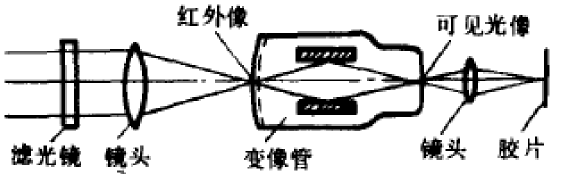


图 1-14　利用光电转换技术的红外摄影原理

红外摄影还可以采用扫描的方式。将地面景物逐点地成像在底片上。图 1-15 示意地表示一种扫描式的红外照相机原理。由地物一小块面积来的红外线经光学系统 2 成像在一个敏感元件 3 上，得到一个与红外像的亮度成正比的电信号。这个电信号经电路 4 处理后点燃一个氖灯 5，氖灯 5 的亮度即与地物的亮度成正比。然后用光学系统 6 将氖灯成像于胶片 7 上（一个亮点）。立方棱镜 1 的旋转轴与飞机飞行方向平行，因此当它旋转时，起到横向扫描的作用。氖

灯5与立方棱镜1同步旋转，使氖灯的像在胶片7上同步地作横向扫描。(图1-15中为垂直纸面)。同时，胶片还以与飞机飞行速度成比例的速度拉动。这样，当飞机飞过欲拍摄的地面上空时，胶片上即以逐条扫描方式记录下了地面景物的红外辐射像。利用这种原理可以记录较长波的红外像。例如采用低温(35～38K)下的锗掺汞，可以记录波长8～13.5μm的红外线。封三彩色附图4是中国科学院航空遥感中心拍摄的森林火灾红外像片。

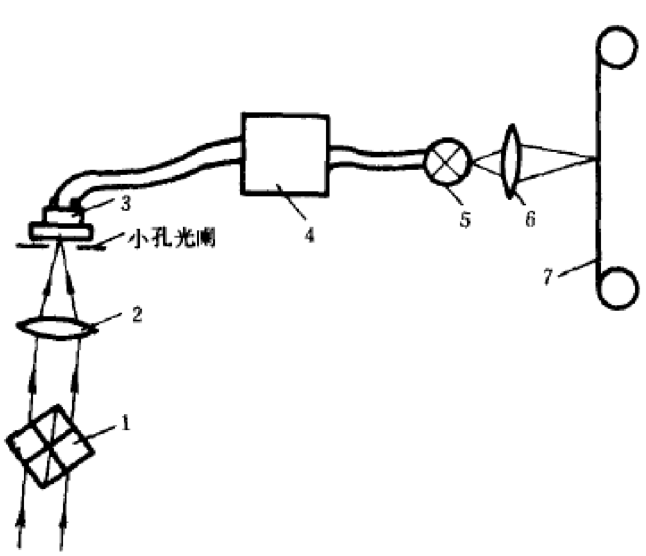


图1-15 红外扫描航空摄影原理

1-5.2 光谱带摄影

利用彩色摄影，由于所获得的照片上增加了被摄景物的色彩，使影像的层次比黑白照片更为丰富，因此可以更有利于从照片上识别目标。军事上彩色航空摄影主要用于侦察城镇目标和复杂地形，例如，研究城镇建筑物细部和判读海岸线附近的海底地貌等。

对于作为资料用的航空照片来说，我们并不要求它的色彩与原景物完全相同，而只要求其上的细节影像彼此能很容易地区分开来，以便于判读。相反地说，例如为了更易于判别军事上的伪装，这种故意造成的色彩失真，倒反而成为我们实现要求的手段。

利用红外摄影，如前所述，可以揭露伪装，并扩大某些景物之间的对比。但在另外一些情况中，它却反而起到相反的效果。如水泥工事，公路和机场跑道等色调较浅的目标，在一般航空照片上，由于绿色植物的背景色调通常较深，很易识别。而在红外照片上，绿色植物的背景由于反射红外辐射的能力较强而变得色调较浅，上述目标就不易清楚分辨。

为要改进照片的判读性能，最好同时在两个以上的光谱段(光谱带)，用两种以上不同增感的感光层来摄取同一景物的景像。这种多层感光层的摄影材料便叫做“光谱带感光材料”。用这种材料进行的摄影相应地叫做“光谱带摄影”。光谱带感光材料可以是三层，也可以是两层。但是它的组成和普通的彩色胶片不同，是根据需要判释的目标而特别选定的。

光谱带胶片可以是黑白的，也可以是彩色的。黑白的光谱带胶片(例如它有一层红外层，一层全色层)，虽然能分别摄得各自易分辨的细节(例如红外层能反映草滩和河水的区别，全色层能反映草地和道路的区别)，但是由于它们是叠合在一起来判读的，两个分色影像的灰色密度的合成，会使很多细节损失掉。因此，光谱带感光材料一般都是彩色的。

彩色的光谱带摄影也叫做“假彩色摄影”。其实，彩色红外胶片就是一种光谱带胶片。利用这种彩色上的故意歪曲，可以取得一些特殊的效果，用于研究一些特定的方面(例如对水质污染的研究，森林树种的研究)。

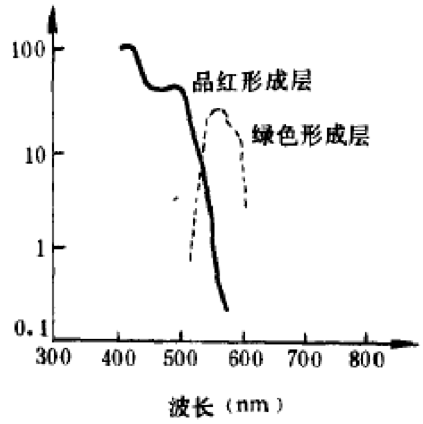


图1-16 一种双层乳剂的光谱带胶片的感光特性

图1-16是一种为研究水的光线穿透性而设计的光谱带胶片的感光特性。这种胶片有两层乳剂层。下层感蓝光和绿光，用黄色滤光层使它只能感受绿光，并生成绿色染料。上层感蓝光和蓝绿光，并生成品红染料。所以这样配置，是因为污染的水中，由于含有大量有机物和浮游生物，它的透明度的峰值由清洁水的 0.48μm 移到 0.55μm 附近。因此，当用这种光谱带彩色胶片(配适当的滤光镜)去研究不同水源时，可以从红、绿两种颜色明显地判断水质的清洁程度。

§1-6 电 摄 影①

电摄影的原理是利用光电导把物体的光学影像转为静电影像。首先对光电导绝缘层均匀充电，然后曝光放电成像。

硒静电摄影系统的基本步骤如下(图1-17)：(1) 充电，(2) 曝光，(3) 显影(色粒的沉积)，(4) 转移，(5) 定影，(6) 净化。

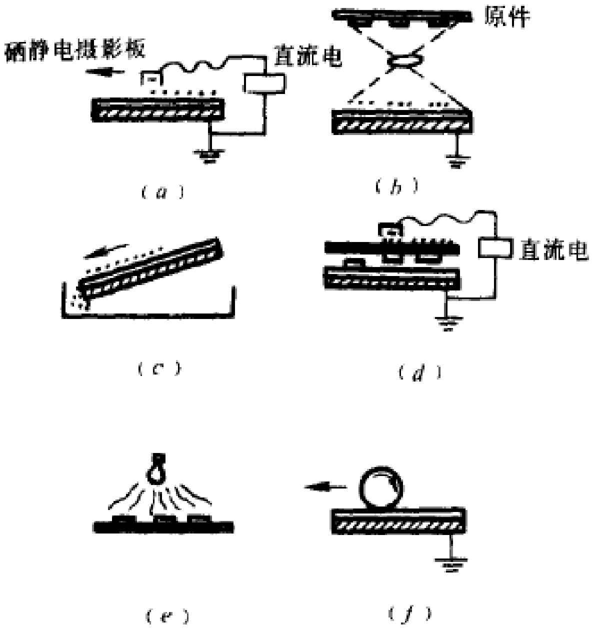


图 1-17 静电摄影的基本步骤

电摄影的过程是：在半导体表面上布上电荷，然后将带电的平板放在摄影机中曝光。由于光的作用，半导体的比电阻下降，于是电荷即从那些被光作用过的区域逸走。在曝光弱的地方只有部分电荷被排除，而在未曝光的地方则仍遗留着电荷。这样，便得到一个电的潜影。这个潜影用带相反电荷的粉末来“显影”。粘在表面上的粉末构成了影像以后，将它转移到任何别的基底上去，并在该基底上用加热的方法固定(定影)下来。基底可以采用不同的物质，如纸、塑料膜等。

各种静电摄影光电导体的相对感光度如表1-3中所示。由该表可知相同物质不同组合以及它们的不同物理状态，可以得到不同灵敏度的半导体层。半导体层厚度可由几个微米到几十个微米。对于不同的物质，在黑暗中比电阻可由每厘米 10^{10}～$10^{15}\Omega$。在光的影响下，比电阻可减到 $1/10^3$。感光灵敏度决定于半导体层的厚度和光导粉末的浓度。

表 1-3 各种光电导体的相对感光度

涂 层 材 料	相对感光度	近似的曝光指数 ASA(钨灯)
氧化锌—树脂混合物	100	0.2
硫化锌—硫化镉磷光体—树脂混合物	500	1.0
硫化锌—硫化镉—树脂混合物	900	1.8
硒—砷合金	3000	6.0
硒—锑合金	12000	24.0
硒—砷—锑(掺碘)	12000～18000	24.0～36.0

电摄影层在制得之后并无感光灵敏性，在曝光之前需将它们加以敏化。敏化过程就是使半

① 关于电摄影过程和系统更详细的讨论，可参阅[19]，p 331-387。

导体的表面充上静电电荷。充电荷的方法很多，常用电晕放电法。将要充电的材料放在通以4000至10000V电压的充电电极下移动。半导体中所充的是正电荷还是负电荷由电极的极性决定。电位的大小决定于充电的时间、半导体层的厚度和导电性。

敏化以后，将带电的表面曝光。曝光后进行显影，常用的显影剂由两部分组成：细小的压碎的有色树脂粉末和颗粒直径达1/3至1/2mm的粗粒材料。这种粗粒材料叫载子，载子的作用是传递树脂粉末颗粒，并借摩擦起电使粉末颗粒带有足够的电荷。平板上的电荷吸住带相反电荷的颗粒，并牢牢地把握住它们。

电摄影（干摄法）的优点是：获得影像的速度较快（几秒钟），不需要溶液，可以达到很高的分辨率，可以利用光谱的长波区域，同时价格又比较便宜。目前黑白电摄影已得到广泛应用，彩色电摄影也能满足彩色复印的要求。

§1-7　摄影材料的感光特性

感光材料的乳剂层经曝光和显影加工后，它的透明程度会由于金属银的淀积而降低。乳剂层透明度的降低程度由很多因素来决定，其中如曝光量的大小、感光乳剂组成、显影加工条件等等。

曝光量 H 是影响透明度的重要因素之一，它是乳剂层上所受光的照度 E 和照射时间（曝光时间）t 的乘积

$$H = Et \tag{1-1}$$

代表了单位面积乳剂层上所接受到的总的光量①。

如果在曝光时间 t 内，照度 E 是个变量 $E(t)$，则曝光量 H 等于

$$H = \int_t E(t)\mathrm{d}t \tag{1-2}$$

曝光量的单位是 lx·s。

变黑感光材料的透明度或透光率或透射系数 T(Transmittance)的定义是，透过材料的光通量 Φ_t 与投射到材料上的光通量（入射光通量）Φ_0 之比

$$T = \Phi_t/\Phi_0 \tag{1-3}$$

乳剂层的透明度随其所接受的曝光量而降低的情形如图1-18所示。由图可见，透明度随曝光量的增加开始迅速下降，然后变化缓慢。

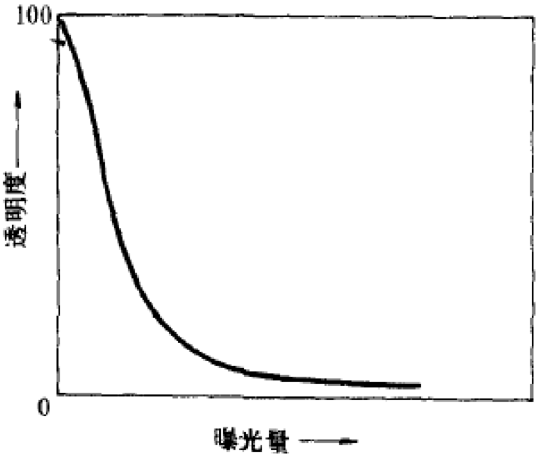


图1-18　乳剂层透明度随所受曝光量的降低情形

为了能更简明地用数学形式来描述乳剂层透明程度与曝光量之间的关系，两位业余摄影家，化学家H·Hurter和工程师V·Driffield，用了约十年的业余时间最后找到乳剂层中淀积银的阻光率与曝光量及适当条件下的显影程度之间的比例关系，并且建议采用曝光量和阻光率的对数坐标来表述它们之间的关系。

阻光率 O(Opacity)的定义是透光率的倒数，

① 本节中对光量的讨论均可推广到不可见的辐射量。

$$O = 1/T = \Phi_0/\Phi_t \qquad (1\text{-}4)$$

阻光率的对数则叫做密度 D(Density)[①]

$$D = \lg O = \lg 1/T = \lg(\Phi_0/\Phi_t) \qquad (1\text{-}5)$$

用曲线来表示出感光材料的密度与曝光量的对数之间的关系(图 1-19),可用以充分描述该感光材料的感光特性。

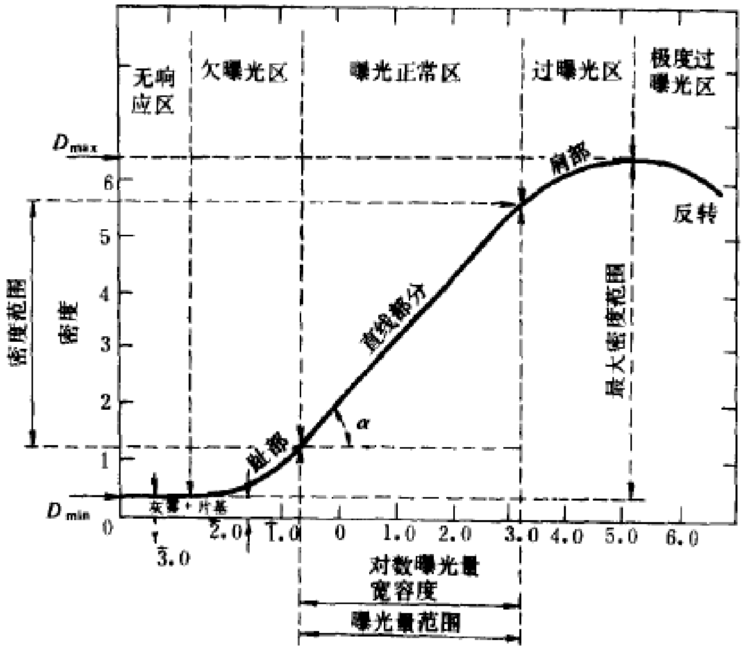


图 1-19 一种感光材料的特性曲线

采用密度是因为乳剂中淀积银的阻光率可以达到 1000,10000,甚至更高,如果以阻光率作曲线,就需要一个很小的比例尺,这时在阻光率小的一端,曲线将缩得很短。而对应于阻光率从 1 到 10000 的变化范围,密度变化仅为从 0 到 4(参见表 1-4),而且曲线的各部分均有足够的比例。另外,采用密度代替阻光率,还带来了数学运算上的方便。当将两个感光材料叠放时,总的阻光率是两个材料的阻光率之积,而密度则为两个材料的密度之和,即,采用密度只需作简单的相加运算。

表 1-4 透光率、阻光率与密度之间的关系

透过百分数	透光率	阻光率	对数阻光率或密度
100	1.0	1	0.0
50	0.5	2	0.3
25	0.25	4	0.6
10	0.1	10	1.0
1	0.01	100	2.0
0.1	0.001	1000	3.0
0.01	0.0001	10000	4.0
0.001	0.00001	100000	5.0

对于相纸来说,乳剂层是涂布在不透明的纸基上。这时对于曝光量的响应应当是乳剂层的反射率 R(Reflectance)和反射密度 D_R(Reflection density)。与前面相类似地可以写出

① 或叫光学密度,黑度。

$$D_R = \lg 1/R = \lg(\Phi_0/\Phi_r) \tag{1-6}$$

式中 Φ_r 为由相纸反射的光通量。$1/R$ 也可定义为阻光率。同样可以相类似地画出相纸的感光特性曲线。

1-7.1 感光特性曲线

感光特性曲线也叫 H-D 曲线(Hurter—Driffield 曲线的略称)①。它以曲线形状表现出了该种感光材料对所接受曝光量的响应特性,感光材料的一些重要感光特性:感光度、反差系数和宽容度等均可由特性曲线确定。

由图 1-19 可见,它可以分成五个部分:

(1) 无响应区。特性曲线的这一部分与坐标横轴平行,密度值大小不随曝光量大小而改变,但不为零。感光材料具有的这一不随曝光与否而变的密度,部分是由于未曝光的卤化银中所固有的显影中心显影后能得到一定的密度,称灰雾(fog),部分则是片基或乳剂明胶层本身的密度。这个不随曝光变化的密度是该感光材料的最小密度 D_{min}。许多书上不严格地就把它叫做灰雾。

(2) 欠曝光区。也叫曝光不足区或趾部。这部分的特性是,当曝光量的对数作相同增量增加时,密度的增量是逐渐增大的,也就是说特性曲线的梯度逐渐增加。用这一部分特性曲线拍摄得到的影像,不能正确地反映景物的对比。影像的影调失真;明暗层次由于对比太小而趋于平淡,影像的阴暗部分缺乏细节。

(3) 曝光正常区。这部分的密度增大随曝光量对数值的增大而等速增大(曲线的梯度是常量,并且是特性曲线的梯度最大值),因此这段特性曲线是直线。如果拍摄时利用了这一直线部分,则被摄景物的明暗对比将以同一比例记录下来。因此曝光正常区也叫正确曝光区或适度曝光区。在实际摄影实践中,曝光量的控制除了尽量利用特性曲线这一直线段外,还往往要利用到欠曝光的趾部。

(4) 过曝光区。也叫曝光过度区或肩部。这部分的特性是,密度的增大速度(梯度)逐渐减小,并在 D_{max}点减至零。同样,它使影像的对比下降,影调失真。由于这部分反映的是景物的高光部分,因此同样使高光部分的影像失去细节。曝光过度还往往使银的颗粒变粗。

(5) 反转区。这是极度过曝光的区域,这时随着曝光量的增加密度反而减少。这种现象也叫负感现象(Solarization)。在实际摄影实践中,一般不会达到这个极度过曝光的区域,但有时也有摄影家会审慎地利用这一现象以得到特殊的绘画效果。

有了感光特性曲线,我们就可以从特性曲线上求出感光材料的一些基本感光特性。如何获得特性曲线将在 § 1-8 中讨论。

1-7.2 反差系数

特性曲线的直线部分的斜率是感光材料的一个重要特性,这个斜率称为反差系数,或叫格

---

① 许多英美书籍中常称之为 D-$\log E$ 曲线,这是因为早期英美文献中用 E 代表曝光量(Exposure),而用 I 代表照度(Illuminance 或 Irradiance),现国际标准及我国标准中均用 E 代表照度,H 代表曝光量,而 I 则代表发光强度(Intensity),故 D-$\log E$ 曲线可以写成 D-$\log H$ 曲线。

玛(gamma,γ)

$$\gamma = \mathrm{tg}\alpha = \frac{D_2 - D_1}{\lg H_2 - \lg H_1} = \frac{\Delta D}{\Delta \lg H} \tag{1-7}$$

其中分母 $\Delta\lg H = \lg H_2 - \lg H_1$ 实际反映的是景物中的明暗色调对比(当所拍摄景物的曝光量全部落在直线部分以内时),而分子 $\Delta D = D_2 - D_1$ 则是影像中所表现出的明暗对比。因此,反差系数 γ 是感光材料重现景物明暗色调能力的一个度量。当 $\gamma=1$ 时,负片重现的色调接近原来景物中的色调关系(相机中的杂光等因素限制了色调的精确重现)。当 $\gamma<1$ 时,负片重现中压缩了原来景物中的明暗色调范围(这种材料叫软调材料),$\gamma>1$ 时则扩展了原来景物中的明暗色调范围(这种材料叫硬调材料)。前面我们讨论过,照片是由底片复制而得到的。因此我们希望 $\gamma=\gamma_1 \cdot \gamma_2=1$,其中 γ_1 是底片的反差系数,γ_2 则是相纸的反差系数。一般全色胶片的反差系数都略小于 1,大约在 0.7～0.85 之间,这是为了能更好地表现出原景物的层次。航空摄影时,由于景物的对比比较小,因此一般都采用 γ 值较大的航摄胶片,其反差系数在 1.6～2.6 之间,只有少数大宽容度的略小些,如我国的航宽－1,$\gamma=1.0$～1.5。

感光材料的反差系数可以用改变显影时间在一定范围内加以控制,增长显影时间就能增大反差系数,用以补偿原来景物对比的不足,减少显影时间使 $\gamma<1$ 则有助于降低照明太强物体的对比。但是增加有一个限度,当反差系数达到一定数值 γ_{max} 时,继续延长显影时间只能增加灰雾,而不会改变特性曲线的斜率。图 1-20 表示一种感光材料用不同显影时间所得到的一族不同反差系数的特性曲线。左上角的小图表示反差系数与显影时间之间的关系,开始反差系数随显影时间迅速增大,而随后变化缓慢并逐渐趋于一个极限 γ_{max},γ_{max} 是感光材料不变的性能。

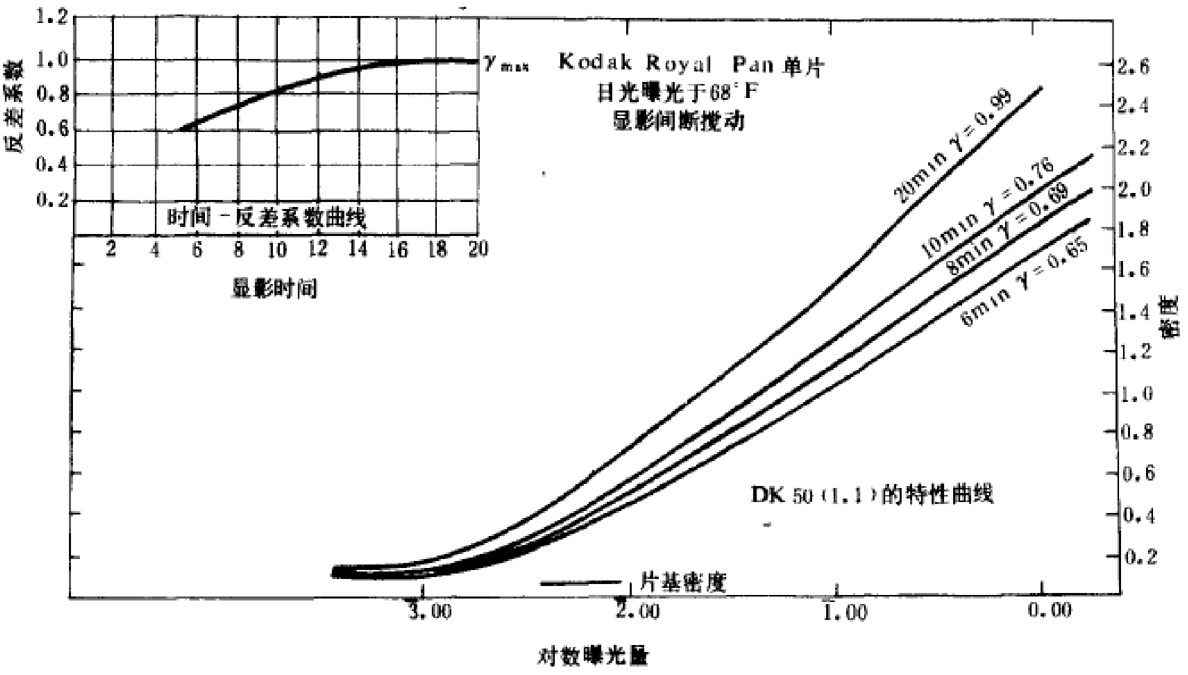


图 1-20　一种胶片的特性曲线族和显影时间-反差系数曲线

反差系数是衡量显影程度的一个有用的度量,但在实践中较难测量正确。有些新的感光材料的特性曲线并无一段直线部分,而是连续向上弯曲的,因此更是无法得出可靠的反差系数。而且,我们前面已经谈到过,实际摄影中除了应用特性曲线的直线部分外,还常要利用趾部。因此,当选择合适的显影时间时,反差系数并不是个最合适的度量。C. J. Niederpruem 等人提出改用对比指数(Contrast Index,CI)的建议,它是美国国家标准中的平均梯度概念的扩展。East-

man Kodak 公司曾在它的一些出版物中用以代替反差系数。

对比指数是在特性曲线上代表高、低密度的两任意点之间的平均梯度(图 1-21)。它是连接指定的最大和最小密度点的直线的斜率。最小密度点位于半径为 0.2 个密度单位的圆上，最大密度点则位于半径比该小圆要大 2.0 个密度单位的同心圆弧上。对于大多数用于业余摄影、商业摄影、电影摄影以及人像摄影的负片胶片，最小密度位于灰雾加片基密度以上 0.05 至 0.15 之间，最大密度则在灰雾加片基密度以上 1.0 至 1.4 之间。同样也可以画出类似显影时间-反差系数那样的显影时间-对比指数关系曲线。

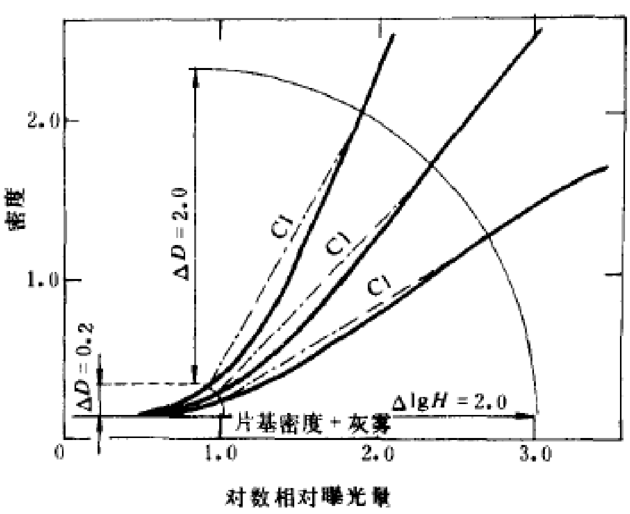


图 1-21　对比指数(C I)曾被建议用以取代反差系数

1-7.3　宽容度

宽容度 L(Latitude)或摄影宽容度是感光材料能按比例记录景物最大和最小亮度的范围。它由特性曲线的直线部分决定(图 1-22)。

$$L = \lg H_2 - \lg H_1 \tag{1-8}$$

例如，若 $H_2=10\text{lx}\cdot\text{s}$，$H_1=0.08\text{lx}\cdot\text{s}$ 则该种感光材料的宽容度为

$$L = \lg 10 - \lg 0.08 \approx 2$$

若物体的对比很大，它的对数曝光量范围大于感光材料的摄影宽容度，则感光材料上就不能按比例地表达层次，即像的密度有的位于特性曲线的直线部分以外。实际摄影中最常遇到的是景物的对比小于感光材料的摄影宽容度，这样曝光时间就可以在某一范围内变动，而不致引起曝光过度或曝光不足。

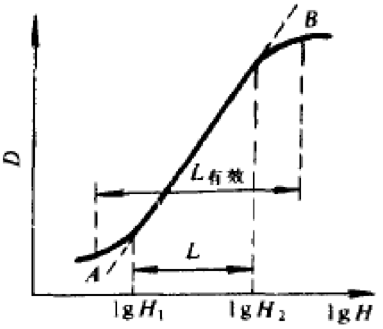


图 1-22　感光材料的宽容度

对于每一个被摄物体来说，它的亮度范围越窄，则它的曝光量允许的变化就越大。实际上，大多数被摄体的亮度范围都小于 100∶1，而一般良好的底片材料，其特性曲线的直线部分对于曝光量对数坐标轴的投影为 1000∶1。因此，摄影宽容度就很大，容许有相当大的曝光量差异。只要在宽容度范围内，同样景物两张密度不同的底片，经正像过程，能获得相同效果的相片。

但是有些景物(例如在雪的背景上有很暗的物体)，它的对比的对数值远大于感光材料的摄影宽容度，这就必须考虑利用特性曲线的趾部和肩部，于是提出有效宽容度的概念。有效宽容度指的是，特性曲线上梯度大于某一值，具备表达影像层次能力的范围，它包括整个直线部分(直线部分的梯度就是反差系数 γ)以及部分趾部和肩部。有效宽容度的端点的梯度值，根据感光材料特性和使用要求，有各种不同的规定，一般为 0.2～0.4 左右。也有取特性曲线 $D_{\min}+0.1$ 到 $D_{\max}-0.1$ 所对应的 $\lg H$ 范围作为有效摄影宽容度的。

感光材料的摄影宽容度也受显影条件的影响，显影时间长时，梯度增大，宽容度即相应

减小。

1-7.4 感光度

感光度 S(Sensitivity 或 Speed)是表示感光材料感光快慢的特性，俗称感光速度。它的定义是：与在一定显影条件下产生一定摄影效果的曝光量成反比的值。也就是说，感光度高的感光材料只需较少的曝光量即能达到感光度低的材料需以较多曝光量所能达到的摄影效果。用公式可表示成

$$S = K/H_m \tag{1-9}$$

式中 H_m 为达到某种摄影效果所需的曝光量，K 为某个选定的常数。所谓某种摄影效果，是指在规定显影条件下能够达到的某一选定密度，这个密度叫基准密度，它随各个国家所规定的标准而不同。

随着摄影技术的发展，各个国家都根据本国的情况制定了各自的各种不同的感光制度，如早期英国的仙纳(Scheiner)制和 H&D 制、现行英国的 BS 制、美国的 ASA 制、前苏联的 ГОСТ 制、日本的 JIS 制，我国的 GB 制以及国际标准化组织的 ISO 制等。各种标准中对不同种类的感光材料又都各有不同的计算方法。这些互不相同的感光度标准，不仅给使用者增添了许多麻烦，而且也妨碍了摄影材料和摄影技术的国际交流。但是自从有了国际标准化组织推荐的感光度标准以后，各国都修改标准尽量向它靠拢，已有逐渐走向统一的趋势。

下面我们将只介绍应用最为广泛的 ASA、DIN、ISO 以及我国 GB 四种制度，并且主要讨论一般黑白照相负片的感光度标准。

一、一般黑白照相负片的感光度标准

1. 美国标准协会感光度测定制(ASA 制)[①] ASA 制感光度标准最早建立于 1943 年，后经多次修改，现执行的是 1972 年修订的 ANSI pH2.5—1972 标准。它以能够得到最佳照片(正片)的底片所需要的曝光量为评定感光度的标准。经过严格的试验证明，优质的照片可以由不同密度的底片得到，能得到优质照片的底片的最低有效密度总是在特性曲线趾部的某一点上，而这一点并不固定。这种负片所摄景物的密度，部分位于曝光不足区，部分位于曝光正常区。ASA 制就是以上述特性曲线趾部的这一点作为基准密度点。具体的做法是：在求取特性曲线时，试片曝光后在指定的条件下进行显影加工处理，控制显影程度使得到的感光特性曲线满足以下要求(见图 1-23)：离 D_A=(灰雾+片基密度+0.1)的基准密度点 A 为 $\Delta\lg H=\lg H_B-\lg H_A=1.3$ 的 B 点的密度，应满足 $\Delta D=D_B-D_A=0.80$。则该黑白负片的 ASA 制感光度由下式确定

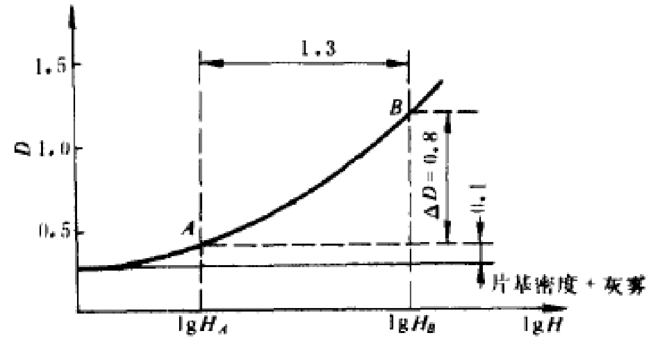


图 1-23 确定 ASA 制感光度时特性曲线应满足的要求

---

① ASA——American Standard Association(美国标准协会)的首字母，该协会于 1966 年已改成为美国国家标准研究所(American National Standard Institute)，因此所制定的标准现已称为 ANSI 标准，但感光度则仍沿用 ASA 标记。

$$S_{ASA} = 0.8/H_A \tag{1-10}$$

因感光度 S 是与曝光量 H 成反比，这种算法就称为算术尺度或算术式计算。用算术式算法得到的感光度，有的书上也叫算术曝光指数(Arithmatić Exposure Index)。

例如，若由黑白负片Ⅰ的特性曲线量得基准密度点 A 的曝光量 $H_Ⅰ=0.004 lx \cdot s$，则由(1-10)式算得

$$(S_{ASA})_Ⅰ = 0.8/0.004 = 200$$

记作 200 ASA。

又若由黑白负片Ⅱ的特性曲线量得基准密度点 A 的曝光量 $H_Ⅱ=0.008 lx \cdot s$，则同样由(1-10)式算得

$$(S_{ASA})_Ⅱ = 0.8/0.008 = 100$$

记作 100 ASA。由此可见，在 ASA 制中感光度数值相差一倍时，感光速度就相差一倍(曝光量差一倍)。

2. 德国工业标准感光度测定制(DIN 制)① DIN 制感光度标准最早建立于 1931 年，经多次修改后，现执行的是 1971 年修改的德国工业标准 DIN4152。它以超过灰雾密度(D_0)0.1 的密度($D=D_0+0.1$)作为基准密度。它的计算公式为

$$S_{DIN} = 10\lg \frac{1}{H_{D_0+0.1}} \tag{1-11}$$

因感光度 S 是与曝光量 H 的对数成反比，这种算法就称为对数尺度或对数式计算。用对数式算法得到的感光度，有的书上也叫对数曝光指数(Logarithmic Exposure Index)

例如，若由黑白负片Ⅰ的感光特性曲线量得基准密度 $D=D_0+0.1$ 点的曝光量 $H_Ⅰ=0.004 lx \cdot s$，则由(1-11)式算得

$$(S_{DIN})_Ⅰ = 10\lg(1/0.004) = 10\lg 250 \approx 24$$

记作 24 DIN(读作“24 定”)。

又若由黑白负片Ⅱ的特性曲线量得 $D=D_0+0.1$ 基准密度点的曝光量 $H_Ⅱ=0.008 lx \cdot s$，即为负片Ⅰ的一倍，则同样由(1-11)式算得

$$(S_{DIN})_Ⅱ = 10\lg(1/0.008) = 10\lg 25 \approx 21$$

记作 21 DIN。由此可见，两种负片的感光度的 DIN 数相差 3(=10lg2)时，感光速度相差一倍。

3. 国际标准化组织推荐的感光度制(ISO 制)② 1974 年正式公布的国际标准号为 ISO/R6 的黑白负片感光度国际标准，是以 ASA 制和 DIN 制为基础的方案，它同时标出了与 ASA 值相同的算术式计算值和与 DIN 值相同的对数式计算值，表示方法如下：ISO100/21°，其中分子与 ASA 值相当，分母与 DIN 值相当。

4. 我国国家标准感光度制(GB 制) 现执行的是 GB2923—82 标准[64]，它是参照 ISO 同类标准的计量方法制订的，感光测定试验的显影程度控制以及感光度的计算方法也完全与国际标准相同，并同时采用算术式和对数式计算感光度值，即

$$S_{GB} = 0.8/H_{D_0+0.1} \tag{1-12}$$

以及

① DIN 为 Deutsche Industrie Norm(德国工业标准)的首字母。

② ISO 为 International Standards Organization(国际标准化组织)的首字母。

$$S^0_{GB} = 1 + 10\lg \frac{0.8}{H_{D_0+0.1}} \tag{1-13}$$

表示法为:GB 100/21°。

应当指出,我国新标准感光度 GB 与国际标准感光度 ISO 还不是完全相同的,因为我国规定感光测定试片的显影加工处理采用了自己规定的配方和条件。

表 1-5 为上述四种感光度的对照表。

表 1-5 普通黑白照相负片的几种感光度对照表

GB	ASA	DIN	ISO	GB	ASA	DIN	ISO
3200/36°	3200	36	3200/36°	100/21°	100	21	100/21°
2500/35°	2500	35	2500/35°	80/20°	80	20	80/20°
2000/34°	2000	34	2000/34°	64/19°	64	19	64/19°
1600/33°	1600	33	1600/33°	50/18°	50	18	50/18°
1250/32°	1250	32	1250/32°	40/17°	40	17	40/17°
1000/31°	1000	31	1000/31°	32/16°	32	16	32/16°
800/30°	800	30	800/30°	25/15°	25	15	25/15°
640/29°	640	29	640/29°	20/14°	20	14	20/14°
500/28°	500	28	500/28°	16/13°	16	13	16/13°
400/27°	400	27	400/27°	12/12°	12	12	12/12°
320/26°	320	26	320/26°	10/11°	10	11	10/11°
250/25°	250	25	250/25°	8/10°	8	10	8/10°
200/24°	200	24	200/24°	6/9°	6	9	6/9°
160/23°	160	23	160/23°	5/8°	5	8	5/8°
125/22°	125	22	125/22°	4/7°	4	7	4/7°

二、一般彩色照相负片的感光度标准

黑白感光材料在一定曝光和显影加工条件下只产生一种密度,得出一条特性曲线,而对于多层彩色感光材料则必须测定三个乳剂层的分层密度,用三条分层的特性曲线才能表示该感光材料的感光特性,也就是说,需要分别测定感蓝层表现为黄色影像的乳剂层,在蓝光的作用下所产生的密度与曝光量的关系,感绿层表现为品红影像的乳剂层在绿光作用下所产生的密度与曝光量的关系,以及感红层表现为青色影像的乳剂层在红光作用下所产生的密度与曝光量的关系。在实际测定时不可能把粘附在一起的三个乳剂层分开单独测定,因此通常采用的是用矫正三原色滤色片测定法,即在测感蓝层时在光源前用蓝滤色片,测感绿层时用绿滤色片,测感红层时用红滤色片。将三个分层的密度值记录在纵坐标上,以产生相应密度的曝光量对数值记录在横坐标上,绘制出三条表示三个乳剂层感光性能的特性曲线[①] (图 1-24)。

这样的说法其实并不严格。因为三层感光层中的染料影像的光谱吸收曲线并不仅仅局限

① 关于彩色感光测定更详细的讨论,可参阅参考文献[22]。

于有限的互相分离的一段光谱范围，而是互相有适当的重叠。例如图 1-25 中所示为美国 Kodak 公司的航空胶片＃2448 中三个染料影像的光谱吸收曲线。因此当用加有矫正滤色片的光源测量分色的密度值时，所测得的不仅仅是某一染料层在其补色光谱段的密度(例如黄色染料影像中的蓝色光谱段的密度)，同时也包含了其它两层染料层在该光谱段的密度。

一般来说，彩色感光材料各层乳剂的感光特性曲线很难做到完全重合，因此三个乳剂层的感光度不可能完全相同。在用彩色负片摄影时，究竟用哪一层乳剂的感光度作为控制曝光量的依据？以图 1-24 为例，三个乳剂层中感蓝层(B)感光度最高，感绿层(G)次之，感红层(R)感光度最低。如果按感蓝层的感光度控制曝光量，那末感红层有可能出现曝光量不足；反之，如果按感红层的感光度控制曝光量，那末感蓝层就有可能出现曝光过度，这两种情况都会引起彩色影像的偏色。

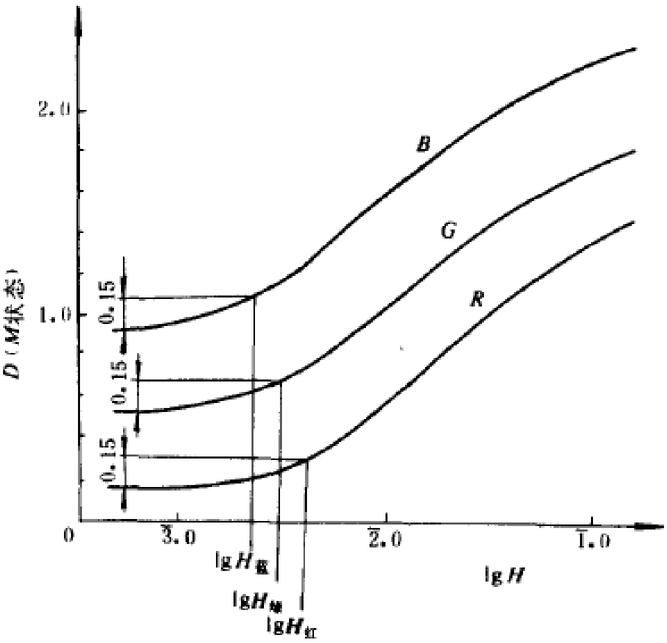


图 1-24 我国国家标准彩色负片感光度的确定方法

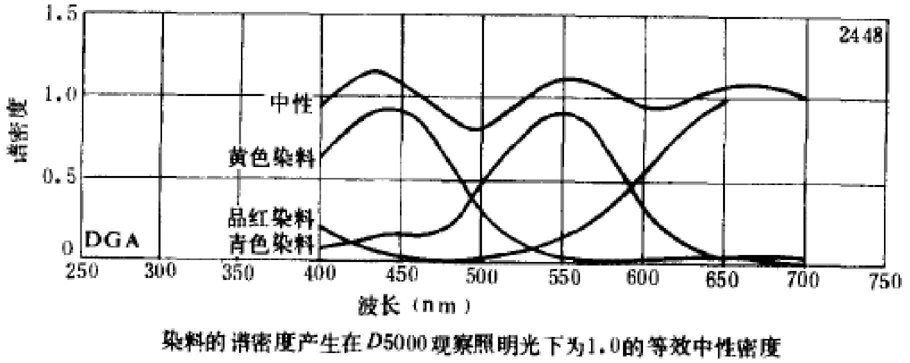


图 1-25 航空胶片＃2448 染料影像的光谱吸收曲线

实践证明，因为人眼对绿色最敏感，使感绿层的曝光量最正确，容易取得最好的色再现性，因此把感绿层的感光度作为计算彩色负片感光度的重要基准，同时兼顾最低感层的感光度，使记录景物最小亮度的影像密度不低于最小密度(片基加灰雾密度)，是控制彩色负片曝光量的可靠方法。

我国参照国际标准 ISO5800－1979 制定的彩色摄影用负片的感光度标准 GB2924－82[65] 规定取感绿层和最低感层的基准点曝光量的平均值

$$\lg H_m = \frac{\lg H_{绿} + \lg H_{最低感层}}{2} \tag{1-14}$$

或

$$H_m = \sqrt{H_{绿} \times H_{最低感层}} \tag{1-15}$$

作为计算彩色负片感光度的基准曝光量。各层乳剂的基准点选在各自的感光特性曲线上最小密度(片基加灰雾密度)以上 0.15 处(见图 1-24)。感光度数值同时采用算术式和对数式计算，即

$$S = \frac{\sqrt{2}}{H_m} \tag{1-16}$$

以及

$$S^{\circ} = 1 + 10\lg \frac{\sqrt{2}}{H_m} \tag{1-17}$$

其表示方法与黑白负片相同，例如 GB 100/21°。

三、航空胶片的感光度标准

我国参照国际标准 ISO7829－1986 制订的国家标准 GB9862－88[66]规定了黑白航空胶片的感光度按下面的算术式计算

$$S = \frac{1.5}{H_m} \tag{1-18}$$

式中的 H_m 为特性曲线上基准密度点对应的曝光量(以勒克司秒为单位计算)。基准密度点的密度等于片基加灰雾密度加 0.3(图 1-26)。

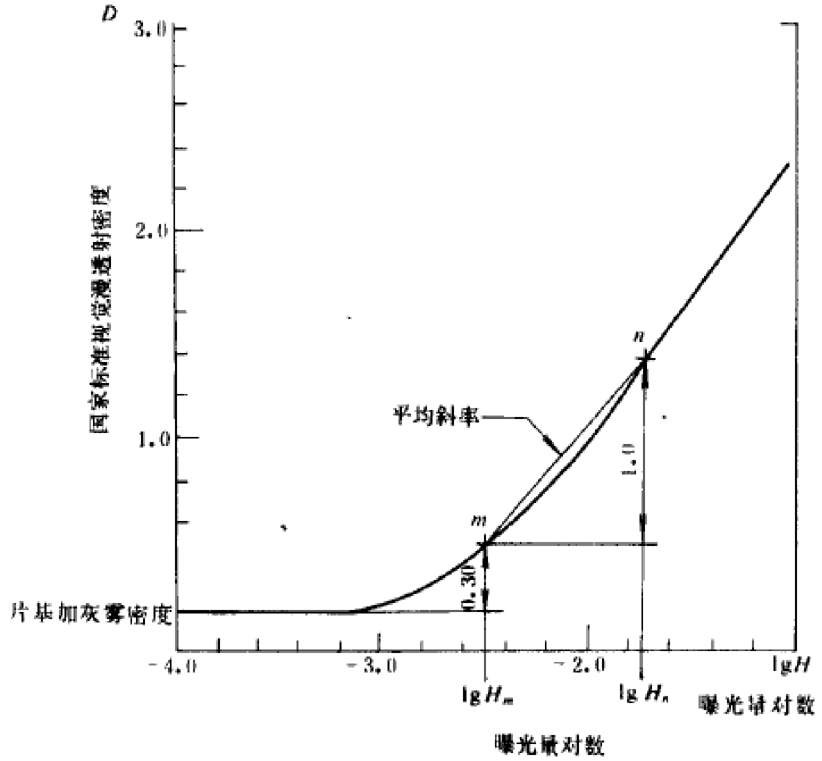


图 1-26 黑白航空胶片感光度和平均斜率的确定方法

航空摄影的情况比地面摄影要复杂得多。在不同的摄影条件下景物的亮度范围有很大的不同。例如，高空摄影时，景物亮度变化范围很小，亮度比损失很大，为了提高影像的对比，除了使用高反差系数的航空胶片外，往往还要用延长显影时间的方法来提高特性曲线的斜率；而低空摄影要记录的景物亮度范围一般很大，除了使用大宽容度的航空胶片外，还必须控制显影条件来获得较小的斜率。此外，大气烟雾和太阳高度等因素也会影响景物的亮度范围。所以在给出航空胶片感光度的同时，还必须给出平均斜率的数值。

我国标准中规定航空胶片的平均斜率 $\overline{G}$ 由下式计算

$$\overline{G} = \frac{D_n - D_m}{\lg H_n - \lg H_m} \tag{1-19}$$

式中 D_m 和 H_m 为基准密度点 m 的密度和曝光量，D_n 和 H_n 为特性曲线上 n 点(图 1-26)的密

度和曝光量,n 点的密度比基准点 m 点的密度高 1.0。

航空胶片的感光度和平均斜率值表示为,例如"GB A100/$\overline{G}$1.2",这和"ISO A100/$\overline{G}$1.2"是等同的。

事实上,同一种胶片用不同的加工方法,会得到不同的感光度值和平均斜率值。改变冲洗加工条件不仅会改变感光度和平均斜率的数值,而且也会改变胶片的其它感光和物理性能参数,如宽容度、颗粒度和分辨率等。为了在各种复杂的航空摄影条件下,都能正确地控制航空胶片的曝光量,得到质量满意的航空像片,规定一种固定的冲洗加工方法作为测定航空胶片感光度的条件是没有意义的。航空胶片也没有一种可适用于各种不同使用条件的理想的反差系数或平均斜率。因此,我国标准没有规定统一的冲洗加工方法,而是建议根据使用的需要,选择适当的感光性能的胶片与适当的加工方法组合来确定航空胶片的感光度和平均斜率。

例如图 1-27 中表示的六条平均斜率 $\overline{G}$ 随感光度 S 变化的曲线,是不同的航空胶片在不同的显影条件(显影时间和温度)下得到的。假如实际摄影条件需要平均斜率 $\overline{G}$ 为 1.6,感光度为 200,从图上相应的虚线可以看出,有四种胶片和加工方法的组合(曲线①、②、③和④)能够满足上述要求,然后再考虑其它的要求进行具体的选择。

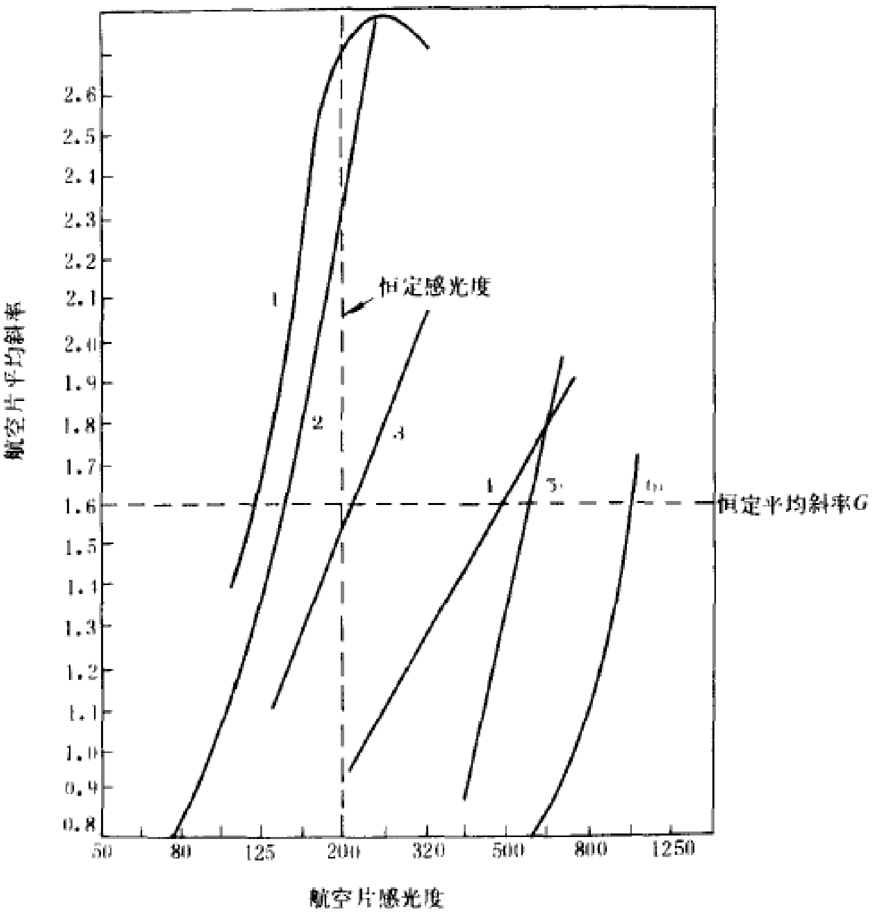


图 1-27 航空胶片与加工方法组合的选择

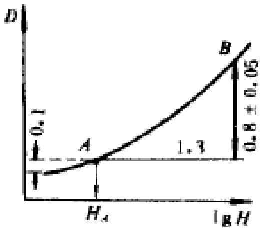
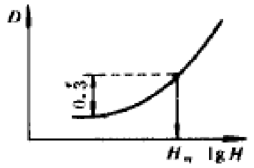
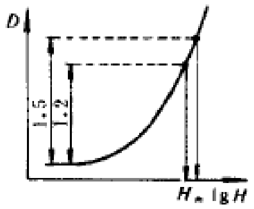
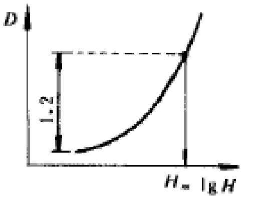
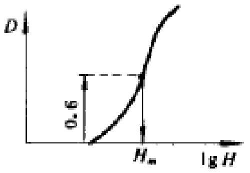
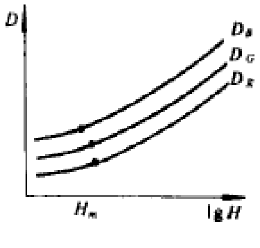
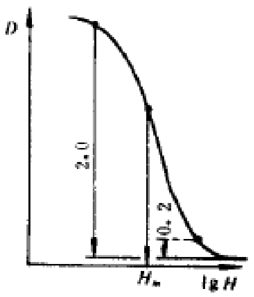
四、其它各类感光材料的感光度标准

下面用表格(表 1-6)举例(美国标准)简单说明不同品种感光材料的感光度的不同算法。

最后需要指出的是,用来标注(说明)感光材料的感光度值是用样片按照标准中规定的曝

光、显影加工条件用感光测定(见§1-8)的方法得出的。尽管这些值是十分可靠的(即有很高

表 1-6　美国各种不同感光材料的感光度算法

应用	方法	公式	参考	注
Ⅰ.黑白片				
A 照相负片		$S=0.8/H_m$	ANSI pH2.5－1972	通常叫 ASA
B. 航空负片		$S=1.5/H_m$	ANSI pH2.34－1969	通常叫航空曝光指数(AEI①)
C. r 射线片(医用)(工业用)		$S=1/H_m$	ANSI pH2.8－1964 (R1969)工业用标准 ANSI pH2.9－1974 医用标准	当不用荧光屏时 H 以伦琴单位计
D. 缩微片		$S=45/H_m$	联邦标准#170D	
E. 相纸		$S=1000/H_m$	ANSI pH2.2－1966(R1972)	
Ⅱ.彩色片				
A. 照相负片		$S=1/H_m$	ANSI pH2.27－1965(R1971)	$\overline{H}_m$ 由三条曲线的三个 $\lg H_m$ 值取平均。
B. 反转片		$S=10/\overline{H}_m$	ANSI pH2.21－1972 (与 ISO2240 一致)	$\overline{H}_m$ 由二个 $\lg H_m$ 值取平均，其中一个位于片基＋灰雾以上 0.2 处，另一个位于片基＋灰雾以上 2.0 处或位于由第一点作切线的切点处，取其小者，只用一条基于目视密度测量的曲线。

① AEI——Aerial Exposure Index

的重复性)，但在实际摄影实践中它可能会给出一个错误的曝光指数，这是因为实际使用时的条件与感光测定时的条件不尽相同。标准感光度或感光速度通常只与测试感光材料时的平均条件相符，它只与感光材料制造厂家中的大多数及某些使用者相一致。考虑到感光材料感光测定与实际使用之间的差别，摄影者必须将感光材料上所标出的感光度看成仅是在照相时确定相机曝光参数的一个大致的指导。

1-7.5 彩色平衡

对于多层彩色感光材料来说，为了能正确地表达景物的颜色，三层乳剂层的感光度应该一致，这种一致性就叫做彩色平衡。测定时，可在一张特性曲线纸上分别绘制出黄色染料层、品红

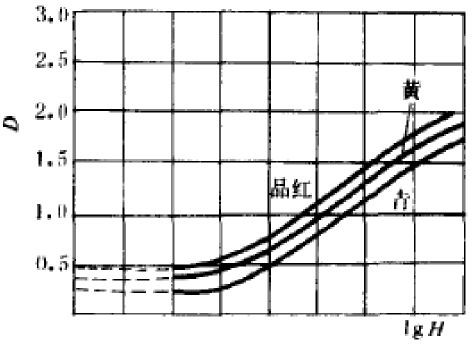


图 1-28 彩色感光材料的彩色灰雾不平衡

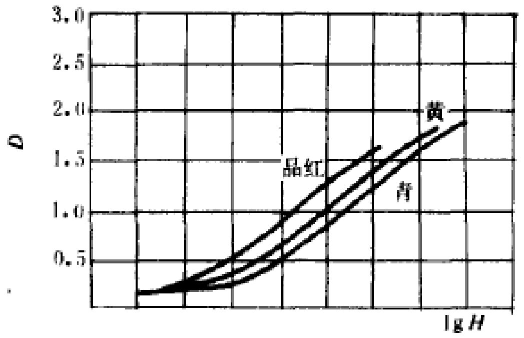


图 1-29 彩色感光材料各层感光度的不平衡

染料层及青染料层的三条特性曲线(一般标注它们所感原色的符号 R、G、B)。如果这三条曲线重合为一条曲线，就说明彩色感光材料中三层乳剂层的照相性能是完全一致的。实际不可能完全做到这一点。彩色感光材料三条特性曲线间的不一致，便是平衡失调。彩色感光材料的平衡失调可能表现在三个方面，即各层的灰雾不一致(图 1-28)、感光度的不一致(图 1-29)和反差系数的不一致(图 1-30)。

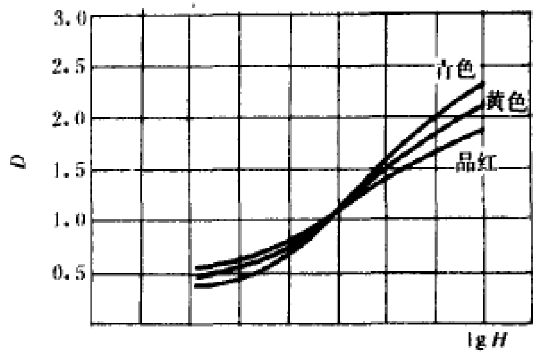


图 1-30 彩色感光材料的彩色反差系数不平衡

彩色灰雾不平衡，在印制正片时可以加彩色滤光镜来矫正。

彩色感光度的平衡程度，用三层乳剂层中最大感光度和最小感光度之比来描述：

$$感光度平衡 = \frac{最大感光度}{最小感光度}$$

对于理想的彩色感光材料，感光度平衡值应等于 1。一般认为感光度平衡值不大于 2.3(彩色正片可达 4.0)时，都可算作感光度合格的彩色胶片。

彩色感光度不平衡也可在印制正片时用加彩色滤光镜的方法来校正，但只限于在宽容度范围之内。感光度失调的底片的特征是宽容度较小和有效感光度低。宽容度小会影响影像重现影调的质量。

彩色感光材料的反差平衡用三层乳剂中的最大反差系数和最小反差系数之差来描述：

$$反差平衡 = 最大反差系数 - 最小反差系数$$

理想的反差平衡此值应等于零。反差平衡值一般不得大于 0.15～0.20，若超过 0.20 便会引起严重的彩色失真，主要反映在影像上的明亮部分和阴影部分的颜色差异失真，例如在底片曝光量大的地方会出现青色，而在曝光量小的地方呈现品红色，结果使正片的画面上低密度处偏品红色而高密度处偏青色。

彩色反差不平衡不能用加彩色滤光片的方法来校正。

1-7.6 光谱感光度(感色性)

除了上面所讨论的可以从特性曲线求得的各项感光特性以外，感光材料还有一个重要的感光特性，就是它的光谱感光度(Spectral Sensitivity)或感色性。光谱感光度是指乳剂对各个不同波长光的敏感性，人眼对可见光谱上不同波长的光有不同的颜色感觉，因此也叫做感色性。前面介绍光学增感时已讨论过(见图 1-4)。

感光材料光学增感的精确程度，随着材料的具体用途及制造厂家的不同而异。例如两种乳剂都可能称之为全色乳剂，但是它们的最高和最低感光度的位置未必相同，对不同波长的光的响应也不会相同。因此有必要测定它们的光谱感光度。所有测定光谱感光度的方法，都是把光谱划分为若干段，把感光材料在这些光谱段中曝光，经显影加工后测定它们的响应密度。

图 1-31 中所示为一种典型航空红外胶片(2424)的光谱感光度曲线。

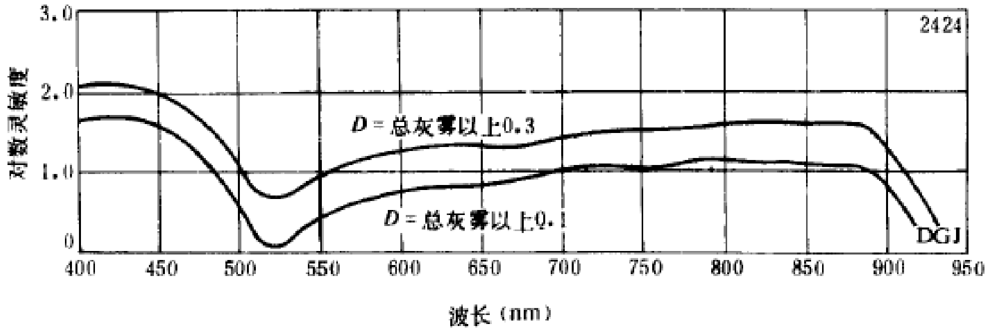


图 1-31 一种典型航空红外胶片(2424)的光谱感光度曲线

§1-8 感光测定

感光测定的目的就是绘制出表征所测感光材料感光性质的特性曲线，即曝光量和密度之间的关系曲线。所有感光测定都可以分为四个不同的操作程序，即：

(1) 在规定的光源下，对一条被测材料(试片)各段进行不同曝光量的曝光。

(2) 按照规定的条件显影加工，获得密度大小呈梯级分布的可见影像。

(3) 测定试片各个曝光段的密度。

(4) 绘出特性曲线。

1-8.1 曝光

感光测定试验中，被测感光材料的试片需在叫做感光仪的专门仪器上进行曝光。感光仪是一种能够给予感光材料一系列有规律变化的精确曝光量的仪器。根据曝光量的基本公式 $H=Et$，感光仪可分调时制(固定照度 E 变换曝光时间 t)和调光制(固定曝光时间 t 变换照度 E)

两类。

感光测定时的曝光条件要求尽可能与被测感光材料实际使用条件相接近。因存在互易律失效(见本节后面讨论)的问题,调时制感光仪产生的误差较大,与实际使用条件相差也较大,因此现主要采用调光制感光仪,它的结构原理如图 1-32 所示。

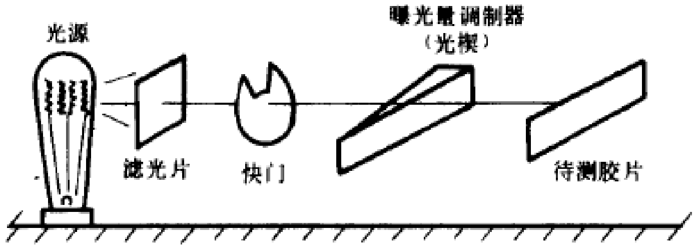


图 1-32 调光制感光仪结构原理图

在调光制感光仪中有一个标准的光源,对它的要求除了光强高、稳定性好、有较长使用寿命等之外,它的光谱成分十分重要。为了使得光源的光谱成分近似感光材料实际曝光时的光源光谱成分(一般照相的照明光源为日光),常需在光源(例如钨丝灯)前面加上选择性吸收的滤光器来校正它的色温(即光谱成分)。

快门提供固定不变的曝光时间。

光楔也叫级谱,是一片涂有石墨或银微粒的玻璃板或胶片,楔的各部分具有不同的透光率,从透光率最高的一头到最低的一头是逐渐变化的。以阶梯式递减的称为阶梯光楔(或称有级光楔),其两相邻级之间的密度差(级差)为 0.05 或 0.10,有 21 级,25 级,30 级不等。以平滑的形式按长度单位递减的称为劈式光楔(也称无级光楔)。光源通过光楔各部分时减弱的程度不同,因此,在感光材料上各段的照度也就不同。

感光材料曝光过程中尚有两个问题需要予以注意的是:互易律失效和断续曝光效应问题。

一、互易律失效(Reciprocity Failure)

曝光量的基本公式 $H=Et$ 表明,对于一个确定的曝光量 H 来说,照度 E 和曝光时间 t 这两个数值可以互换,而所得到的曝光效果(即显出的影像密度)应该是相等的,这种关系叫做互易律或倒易律。例如照度为 100lx、曝光时间为 1/100s,或照度为 50lx、曝光时间为 1/50s,即照度为 $a$lx、曝光时间为 $1/a$s 时,曝光量均为 1lx · s,它们的曝光效果应该完全相同。但是实践表明并非完全如此。当感光层接受的照度太大或太小,或是曝光时间太长或太短时,相同的曝光量并不产生相同的密度。例如,同样是 10lx · s 的曝光量,照度为 100lx、曝光时间为 1/10s 和照度为 10000lx、曝光时间为 1/1000s 所得的密度是不一样的。两张胶片同时显影时,后者的密度要比前者小。这种现象就叫互易律失效。一般说来,曝光时间在 1/10～1/1000s 互易律是成立的,超出这个区间就需修正,曝光时间小于 1/1000s 时需增大光圈和延长显影时间。

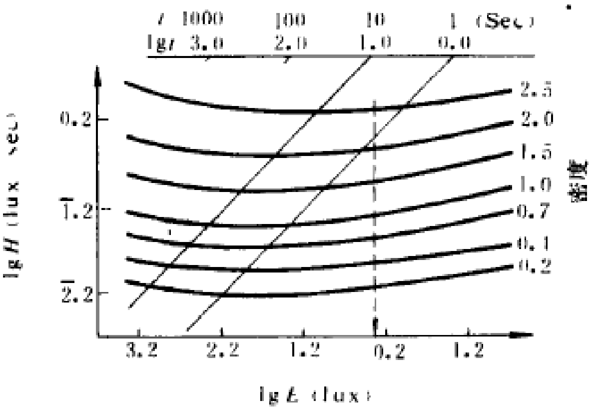


图 1-33 一种乳剂的互易律失效曲线

图 1-33 表示一种乳剂的一些互易律失效曲线。曲线表明，如要得到同样的密度，不同的 E 或 t 时所需的 H 是不同的。

二、断续曝光效应(Intermittency Effect)

用由多次间断的曝光叠加构成的曝光量得到的密度一般与由同样光能量的单次曝光得到的密度并不相同。这实际上就是互易律失效影响的一种表现。这种现象叫做照相曝光的断续效应。断续效应对感光仪的设计很重要，因为有一种调时制的感光仪是用一个扇形开孔的旋转轮来调制固定强度光源以改变曝光时间的。这种原理的感光仪就因为互易律失效影响严重而被调光制的感光仪所取代。

1-8.2 显影加工

按照国际标准化组织推荐感光测定方法中的规定，试片在感光仪上曝光后，应在 1～2 小时内按规定的条件进行显影加工处理。所谓规定的条件是指处理药液的配方、温度及搅动等条件。只有严格控制这些条件，才能保证测定的结果具有较高的重复性以及可比较性。

1-8.3 密度测量

测定试片上各段的变黑程度或染料影像密度是在叫做密度计的仪器上进行。

在感光测定中，由于量测的方式不同，会得到不同类型的光学密度(图 1-34)：单向密度和漫射密度。

单向光束经被测层后的非散射部分所决定的密度，叫做单向密度(图 1-34，*a*)。

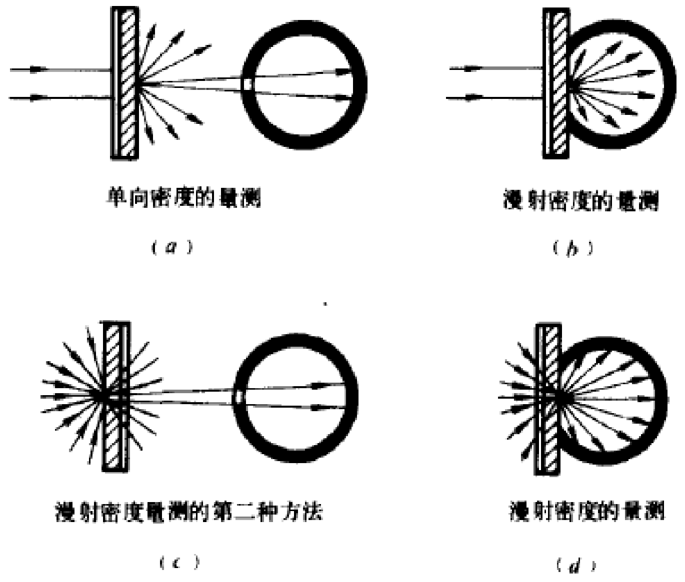


图 1-34 不同类型光学密度的量测

如果将集光器(积分球)紧靠被测试片，则集光器所接受的是全部透射的光线(图 1-34，*b*)，这样决定的密度叫做漫射密度。

根据光线可逆的原理，漫射密度也可用漫射光源照明被测试片，然后在接受一侧只接受透射过来的非散射部分这样来决定(图 1-34，*c*)。

漫射光束经被测层后透过的全部光线所决定的密度，则叫做复漫射密度(图 1-34，*d*)。

单向密度与漫射密度之比叫做卡里尔系数或 Q 因子(Callier Coefficient 或 Q factor)。Q 因子等于 1.0 表示感光材料的单向密度与漫射密度相同，即密度与测量时的几何关系(指积分球离试片远近)无关。彩色感光材料的影像系由染料组成，它几乎无散射，故有一接近 1.0 的 Q 因子。黑白材料的银影的颗粒大小和分布情况则与光的散射程度有很大关系，Q 因子可由接近 1.0 变化到 1.5 甚至更大。一般说来，感光度高的乳剂银的颗粒较粗，因此较感光慢的乳剂有更大的 Q 因子。

单向密度和漫射密度在摄影中都有用处。例如对于一张用于接触印像的底片来说，漫射密度更为重要，因此漫射密度常叫做接触印片密度。单向密度值应用于放映或放大印像。

对于相纸，测量的是反射密度。测定反射密度时，投射光以 45°角射于相纸表面，而从 90°角位置测定反射光(图 1-35，*a*)，或者光源光束垂直投射到被测相纸，而用一环状光电池接受漫反射光(图 1-35，*b*)。

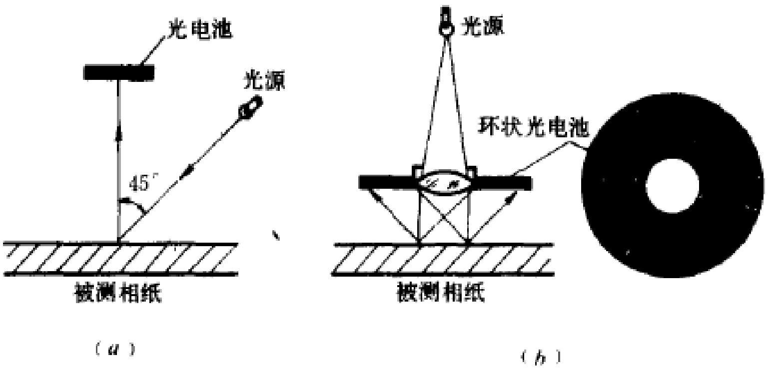


图 1-35　反射密度计的光路原理图

§ 1-9　摄影影像质量的评价

我们讨论评价摄影影像质量的以下几个指标：颗粒性和颗粒度、清晰性和清晰度、分辨率及调制传递函数。

1-9.1　颗粒性和颗粒度

黑白感光材料上的影像是由银粒组成的。银粒的粗细，直接影响照片的质量。人眼在一般情况下看底片或照片的像时，总觉得是比较均匀的，看不到有什么颗粒状态。但随着放大倍数的增加，影像就不再是均匀的了，它会出现颗粒状态。这就是银影的颗粒性的显现。

颗粒性(Graininess①)是人眼观察摄影影像时的主观感觉，它不仅与颗粒大小及分布有关，而且也与颗粒的颜色、密度水平、观察条件、人眼的生理以及视觉心理等因素有关。银影颗粒性的客观描述叫颗粒度(Granularity)。

既然颗粒性是观察者对银影不均匀性的一种主观感觉，因此衡量一种感光材料的颗粒性只能采用目视比较的方法来判断。通常采用的方法是将均匀曝光和均匀显影的试片，在一定照

① 参考文献[8]中将 Graininess 误为颗粒度，而将 Granularity 则误为颗粒性。

明条件下以不同放大倍数的显微镜进行观察，颗粒性就以能看到颗粒现象的最小放大倍数 M 的倒数作为评定的依据，即颗粒性 G 等于

$$G = K/M \tag{1-21}$$

K 为选定的常数，一般取 100。

表 1-7 中列举用上述方法确定的前苏联几种胶片的颗粒性 G 值。

表 1-7 几种胶片的颗粒性

胶 片 名 称	G	胶 片 名 称	G
35mm 全色中调	20	PФ-3 型	20
幻灯片	12	ПАН-5 型	20
ФТ-30 型	11	ПАН-10 型	20
ФТ-31 型	12	红外片	22

使用仪器（例如用微密度计 microdensitometer）测量宏观上是恒定密度的均匀曝光均匀显影的试片所求得的能客观描述影像颗粒结构的数值，叫颗粒度。测量颗粒度的方法很多①，各种方法测得的数据代表意义不同，不能加以比较。但由于乳剂层中的卤化银颗粒大小和分布都是随机的，因此颗粒度的测量需要应用统计的方法。常用的方法是将一条待测试片经均匀曝光并显影加工至密度等于 1 后，用一扫描光孔面积为精确已知的微密度计对试片进行扫描（Kodak 公司发表的颗粒度数据用的扫描孔径为 48μm），取得一系列互不重叠的样本（即采样步长等于扫描孔径）的密度读数，经数字化后记录于磁带上。然后将所得数据利用下述公式计算其标准偏差或均方根（rms）偏差 $\sigma(D)$

$$\sigma(D) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{(D_i - \overline{D})^2}{N-1}\right]^{1/2} \tag{1-22}$$

式中 D_i 为第 i 个样本面积的密度，$\overline{D}$ 则为全部 N 个样本面积的平均密度。为了得到精确的结果，N 应为 1000 左右，因此宜用计算机来处理。这样得到的颗粒度叫 rms 颗粒度。

表 1-8 列举几种美国航空胶片的 rms 颗粒度，它是用一 $f/2.0$ 系统、直径 48μm 扫描光孔对均匀曝光均匀显影的试片扫描得到的漫射密度的标准偏差。

表 1-8 几种航空胶片的 rms 颗粒度和分辨率

胶 片 名 称	胶 片 代 号	rms 颗粒度 ×10³	分辨率（l/mm）	
			1000∶1	1.6∶1
Plus-X Aerographic	2402	19	100	50
Tri-X Aerographic	2403	33	80	25
Panatomic-X Aereocon	3410	13	250	80
High-Definition Aerial	3414	9	630	250
Aerochrome Infrared	2443	17	63	32
High-Definition	SO-131	9	160	50
Aerochrome Infrared	SO-130	9	160	50
Aerial Color	SO-242	11	200	100
Anscochrome	D/500	45	80	40
Panatomic-X Aereocon Ⅱ	SO-239	9	400	160

① 参看参考文献[19]，p 225-230。

利用这个标准偏差或 rms 颗粒度 $\sigma(D)$ 可确定出 Selwyn 颗粒度 S，它们之间有关系

$$S = \sigma(D)(2A)^{1/2} \tag{1-23}$$

式中 A 为微密度计中所用扫描光孔的面积。知道一种 A 值的 $\sigma(D)$ 以后，可由上式求得常数 S，由之可以计算其它 A 值时可能出现的 $\sigma(D)$ 值。显然，$\sigma(D)$ 值随着扫描光孔 A 的缩小而增大。这一点是很显然的，因为光孔面积 A 对颗粒度起的是平滑作用。

对于一种给定的胶片，影像的颗粒度与显影时所用的显影液类型、显影程度、显影得到的影像平均密度以及卤化银颗粒大小及分布情况有关。颗粒度的增加大致与密度的平方根成正比(图 1-36)，因此要避免过曝光和过显影，影像中低对比的细节的平均密度不要比 1.0 大得太多。

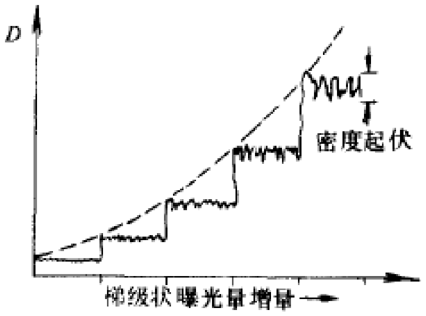


图 1-36 颗粒度随密度增加而增加

一般说来，高感光度的感光材料的卤化银颗粒较大，所以颗粒度值也较大。颗粒度的大小还与反差系数成正比。R.C.Jones 对乳剂提出了一个有用的品质因数(figure of merit)M，其中颗粒度也是它的因子之一

$$M = \frac{K \times 感光度 \times \gamma}{颗粒度} \tag{1-24}$$

K 为一常数。

当我们将感光乳剂层看作信息存储介质来比较它们的性能时，乳剂层的颗粒度值就显得十分重要。作为信息存储介质，我们感兴趣的是该乳剂层能够记录多少个可区分开的密度级(distinguished density levels，DDL)。DDL 的数目受三个因素限制，即，颗粒度、乳剂有用的密度范围 DR 以及我们对区分相邻密度级所要求的置信度。为了预测可用的 DDL 数目，我们需要对整个密度范围 DR 内等间距的各密度级的平均密度的 $\sigma(D)$ 求其平均值 $\overline{\sigma(D)}$。可用的 DDL 数目即可由下式估计

$$\text{DDL 数} \approx \frac{\text{DR}}{2K\,\overline{\sigma(D)}} + 1 \tag{1-25}$$

K 为我们选择的标准偏差数(对于高斯概率分布的颗粒噪声起伏，$K=1$ 即 $\pm 1\sigma$ 时，置信度为 68%，$K=2$ 时，置信度增至 95%，但 DDL 数相应减少一半)。

例如我们来计算美国陆地卫星(Landsat)上激光束记录仪(Laser Beam Recorder，LBR)所用 SO-239 胶片能够记录的 DDL 数。Kodak 公司给出这种胶片的漫射 rms 颗粒度为 9×10^{-3}(见表 1-8)，它是由孔径 48μm 的光孔扫描得到的。激光束记录仪中投射到胶片的有效像素尺寸为 57μm 见方，故按(1-23)式计算得出 rms 颗粒度值为 6.7×10^{-3}。将此值以及 DR 值(约为 1.5)代入(1-25)式，求得当 $K=1$ 时 DDL 数为 113。因此，将胶片上的影像密度作 6-bit① 的量化(相当于地面景物的 64 个亮度级)时，所得数据是可信的($\pm 1\sigma$)。

对于照相乳剂来说，信息容量可表示成单位面积中能够存储的 bit 数。表 1-9 中列出四种胶片的实验数据。最后一行是高密度磁带(high-density tape，HDT)的数据，以作比较。

---

① bit—binary digit 二进制位，或译作比特。

表 1-9 四种胶片和高密度磁带的信息容量

	信息容量 bits(10^6cm^{-2})	每个 bit 的面积 (μm^2)
Royel-X	0.449	223
Tri-X	0.845	118.4
Plus-X	1.86	53.8
Pan-X	2.85	35.0
HDT①	0.031	3226

①20Kbit/in，用 10 磁道。

1-9.2 清晰性和清晰度

清晰性(Sharpness①或 acuity)是人观察摄影影像细节时的一种主观感觉或印象，这种感觉或印象是在考察亮区和暗区的边界处影像密度的变化时得到的。当将感光材料一部分遮住使不受光照，而其相邻接部分则不受保护(图 1-37,*a*)，即给予感光材料以一"刀刃曝光"时，影像被遮部分的密度并不立刻降为零，这是由于反射、折射、衍射以及散射等而使光线侵入被遮部分，感光材料的实际曝光情形如图 1-37,*b* 中所示。显影加工过程中还有一种所谓邻接效应

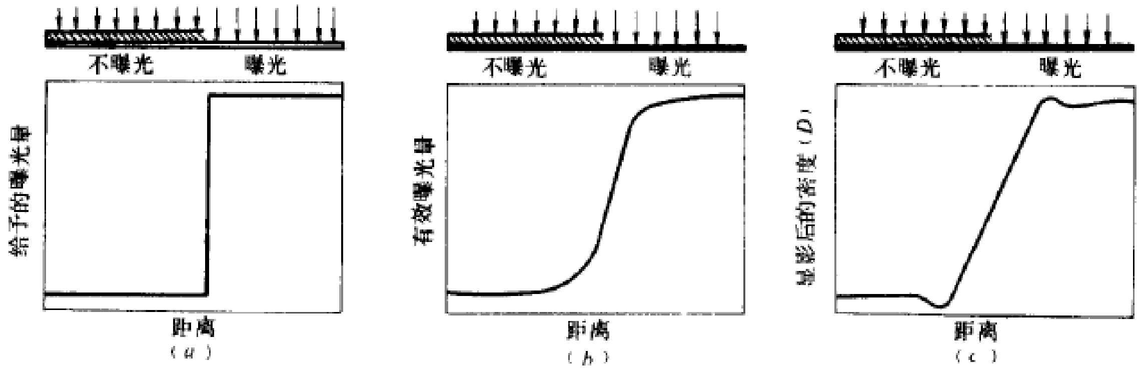


图 1-37 解释清晰性的示意图

(adjacency effect)，它是由于在高密度区和低密度区之间公共边界处所发生的不均匀显影造成的边缘效应。受强曝光区已发生显影作用后的失效显影剂向弱曝光区扩散，使弱曝光区的显影更加减弱，而弱曝光区的有效显影剂向强曝光区扩散，又进一步加强了强曝光区的显影，最后显出的密度分布如图 1-34,*c* 中所示。细颗粒和薄乳剂层的感光材料边界处的散射量较粗颗粒和厚乳剂层的感光材料要小，所成影像的清晰性要优于后者。

影像清晰性的客观度量叫清晰度(Acutance)。它的测量方法是，在准直光下用接触印像法给予被测乳剂以"刀刃曝光"，显影后用微密度计测量刀刃附近影像各点的密度，画出如图 1-38 中的密度曲线。在

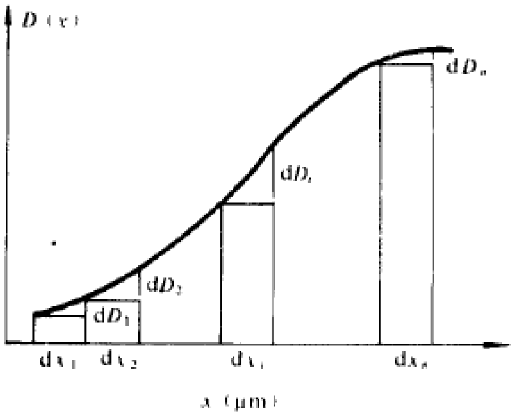


图 1-38 感光乳剂清晰度的计算

① 在英文中有时不严格地用 definition 这个词来谈及清晰性和后面要谈到的分辨率等概念。

曲线两端选择 A、B 两点，其密度梯度为

$$g_A = g_B = (\mathrm{d}D/\mathrm{d}x)_A = (\mathrm{d}D/\mathrm{d}x)_B = 0.005$$

然后计算 A、B 两点间密度曲线的均方梯度

$$(\overline{g}^2) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} g_i^2 \tag{1-26}$$

式中 $g_i = \mathrm{d}D_i/\mathrm{d}x_i$。

清晰度 A 即为其规一化值

$$A = (\overline{g}^2)/D_{AB} = (\overline{g}^2)/(D_B - D_A) \tag{1-27}$$

由于清晰度是与主观感觉的清晰性相关联的，因此一般均应对最后得到的正片进行测量。清晰度在评价航空影像质量中无用处。

1-9.3 分辨率和调制传递函数

摄影影像中可分辨的细节反映了摄影系统重现景物细节的能力，它是镜头分辨率和胶片分辨率的合成表现。关于镜头的分辨率我们将在§3-1中讨论，这里主要讨论胶片的分辨率。

分辨率是感光乳剂能够记录景物细节的本领。它的测定方法是用待测的感光材料将一种叫做分辨率板的图案拍摄成很小的底片，然后在30～70倍显微镜下观察。分辨率板上的图案形式很多①，但多数是采用多组粗细不等黑白相间的平行线条，用它代表不同细节的景物。观察待测感光材料上所摄分辨率板图案的影像时，超出感光材料分辨率的图案模糊一片，不能分辨出它的线条来。感光材料分辨率的大小就以每毫米能分辨多少条线，l/mm（因是黑、白线条相间地成对出现，有的书上用每毫米线对数 line pair/mm，简作 lp/mm）来表示。显然，分辨率板上图案（黑、白线条）的对比度是影响可分辨程度的重要因素，特别是航空摄影中，地面被摄景物的亮度的对比度变化范围很大，因此用于航空摄影的感光材料，常需分别给出对高、低对比分辨率板测出的分辨率值。普通照相胶片则一般仅给出高对比情形下的分辨率。

表1-10中给出了几种普通胶片的分辨率值。航空胶片分辨率值的例子已列于表1-8中。

表1-10 几种普通胶片的分辨率值

感光材料	分辨率 l/mm	感光材料	分辨率 l/mm
富士 AI	47	富士计测全色片	143
东洋 1200	43	国产 GB 18	100
富士制版片	83	国产 GB 21	85
富士硬调片	114	国产 GB 24	75

影响胶片分辨率数值的因素，除了胶片本身的性质外，还有试验分辨率板的图案的结构，它的对比，光的波长，曝光程度及显影条件等。

因各国各厂家使用的测定分辨率的仪器及冲洗条件不同，所得分辨率数值可能有很大出入，因此不宜直接作比较。

乳剂本身对分辨率的影响，主要有：(1) 银粒大小，一般说来颗粒愈细分辨率就愈高。(2) 光在乳剂内部的散射，它与乳剂厚度，表面的平整性以及片基的反射等有关。散射的结果使像

① 见第三章中的图3-5。

点扩展，分辨率降低。

国外航空侦察用的胶片分辨率已有每毫米 400 线的，有的特殊胶片甚至达到每毫米 1600 线。

更全面完整地来描述感光材料记录景物细节本领的是调制传递函数[①] (MTF)。设对于给定空间频率 ν，物的调制度为 $M_O(\nu)$，曝光时在感光乳剂中同一频率的影像的调制度成为 $M_H(\nu)$，则感光乳剂的调制传递函数 MTF 定义为

$$\mathrm{MTF}(\nu) = \frac{M_H(\nu)}{M_O(\nu)}$$

显然，对于不同空间频率 ν，感光乳剂的 MTF(ν)值也不同，于是我们可以画出一条完整的曲线来说明该感光乳剂对不同频率物的调制度的传递本领。图 1-39 举例说明两种航空胶片的 MTF 曲线。

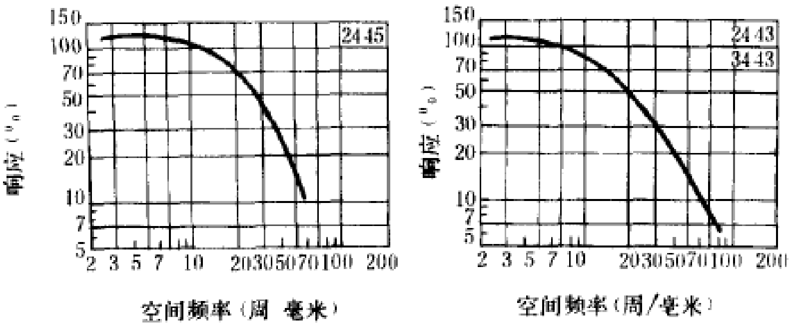


图 1-39 两种航空胶片的 MTF 曲线

在航空摄影系统中还常对所采用的胶片用实验的方法给出所谓阈调制度曲线(TMC)。这种曲线在摄影系统的设计阶段十分有用。有了这种曲线，再加上摄影镜头的 MTF 曲线，我们就可以预测用这样的镜头-胶片系统可能达到的分辨目标的能力。

所谓阈调制度，指的是对给定的感光乳剂，对于给定空间频率 ν 的物所成的像能为人眼所分辨时，要求落到该感光乳剂上的该频率 ν 的物的最小调制度。或换句话说，只有当物的调制度不小于该阈值时，该感光乳剂才能给出为人眼所分辨的影像来。显然，对于不同的空间频率的物要求不同的阈值，因此可用一条曲线来描述。

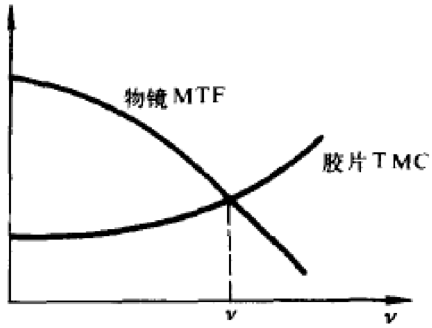


图 1-40 由物镜 MTF 曲线和胶片 TMC 曲线求综合分辨率

当与摄影物镜结合时，物镜所成的像就是感光材料的物。因此，物镜的 MTF 曲线与感光乳剂的阈调制度曲线的交点处(图 1-40)，就指出了这一摄影系统可能分辨的最高空间频率，也就是它们的综合分辨率。

① 关于调制度和调制传递函数的一般概念，在其它课程中已有详细讨论，可参阅例如范少卿、郭富昌编的物理光学 p 149-152，或参考文献[8]第十章，我们在第三章里还作了一些讨论(见 § 3-1)。

第二章　摄影仪器概论

§2-1　摄影仪器的基本组成和分类

摄影仪器的种类繁多，这是因为它的应用范围极广，各种应用目的提出了各自不同的要求，也就导致发展了摄影仪器各种不同的工作原理和结构组成。因此，要想只用一种完美的分类方式将摄影仪器概括成若干类别，是极其困难的，也是没有必要的。在本章里，为了便于学习和讨论，我们将分节介绍普通摄影仪器、地面远程摄影仪器、航空(及卫星)摄影仪器，以及高速摄影仪器，另外专用一节讨论一下所谓多谱段摄影系统。这些仪器或系统既有共同之处，又各有其特点。虽不能说已经包括了摄影仪器全部，但至少已能对摄影仪器有个比较全面的了解。在讨论上述各种仪器时，根据需要和可能再作一些适当的分类。

尽管摄影仪器品种繁多，功能各异，但因都是采用光学成像、感光材料记录这样的基本原理，因此它们的基本组成部分是大同小异的。这里先对它们作个简单介绍。

一台摄影仪器必不可少的组成部分大致有以下几部分：

(1)物镜，俗称镜头。它是摄影机造像的主要部分。从所拍对象来的光线，通过物镜聚集到感光材料上，形成与被摄对象酷肖的光学影像。

为了拍摄不同远近距离的景物，使物像和感光材料精确重合，物镜一般可以相对于感光材料移动，这是借助于所谓调焦机构来实现的。在有的摄影机中，在调焦的同时还将景物距离指示出来，调焦装置同时也是测距装置。在航空摄影中，由于景物离摄影机极远，可以认为物像总是成在物镜的焦平面上，一般就不再需要调焦机构。但是对于一些焦距很长的航空摄影机，由于使用环境等因素的变化，会使出厂时调整好的物镜焦面与胶片平面之间的重合关系遭到破坏(所谓离焦)，这种摄影机往往设有补偿离焦的装置。

(2)取景器。选择拍摄景物范围的装置。

(3)光阑。这里指的是孔径光阑，俗称光圈。它的主要作用是改变物镜的有效孔径，从而改变景物影像的明暗程度，也就是改变曝光量公式 $H=Et$ 中的 E。光圈一般安置在物镜中间或其附近光束口径最小的地方，并可随需要调节它的大小。

(4)快门。用以控制摄影时光线进入相机的时间(曝光时间)，也就是改变曝光量公式 $H=Et$ 中的 t。快门可以设在物镜和胶片之间光路中的任何位置，但一般常放在物镜附近(叫物镜快门或镜头快门)或是像面附近(叫焦面快门)。

(5)机身和暗盒。这是摄影机的基体，它将物镜、光阑、快门、感光材料、以及取景器等结合成一个整体(航空摄影机一般另有操纵器，取景器常安装在操纵器上，参看图 2-15)安装感光材料的部件叫做暗盒，有的就是机身的一部分，有的则可从机身独立分离。与其相关的还有输片(卷片)机构、计片机构等。

除了以上几个基本部件外，不同类型的摄影机还有各自的特殊结构。例如一般小型相机都有延迟快门启动的自拍机构、与闪光灯配合使用的连动机构等，航空摄影机则还可能有像移补偿机构、多航线拍摄的摇摆机构、偏流角装定机构等。

从第三章起将分章讨论各个主要部件或系统的结构、原理以及设计中的一些主要问题。

§ 2-2 普通摄影仪器

这里指的就是我们日常生活中无论是专业摄影工作者(照相馆的照相技师、摄影记者以及摄影艺术家等)还是业余爱好者所进行的一般摄影活动所用的摄影仪器。"一般"或"普通"一词是相对于后面各节将要介绍的限于一定范围、满足一定要求的特殊摄影而言的。一般摄影所使用的摄影仪器可以从结构笨重简单的木质座机到型式繁多的各类新型自动或半自动照相机。随着人民生活的不断提高,照相机和摄影活动愈来愈成为人们生活中一个不可缺少的组成部分。为了满足人民的需要,我国照相机的生产和研制也有了蓬勃的发展,型号和品种不断增加,质量也在不断提高。

图 2-1 中是普通照相机中的一些主要类型。我们只作一些简单的说明。

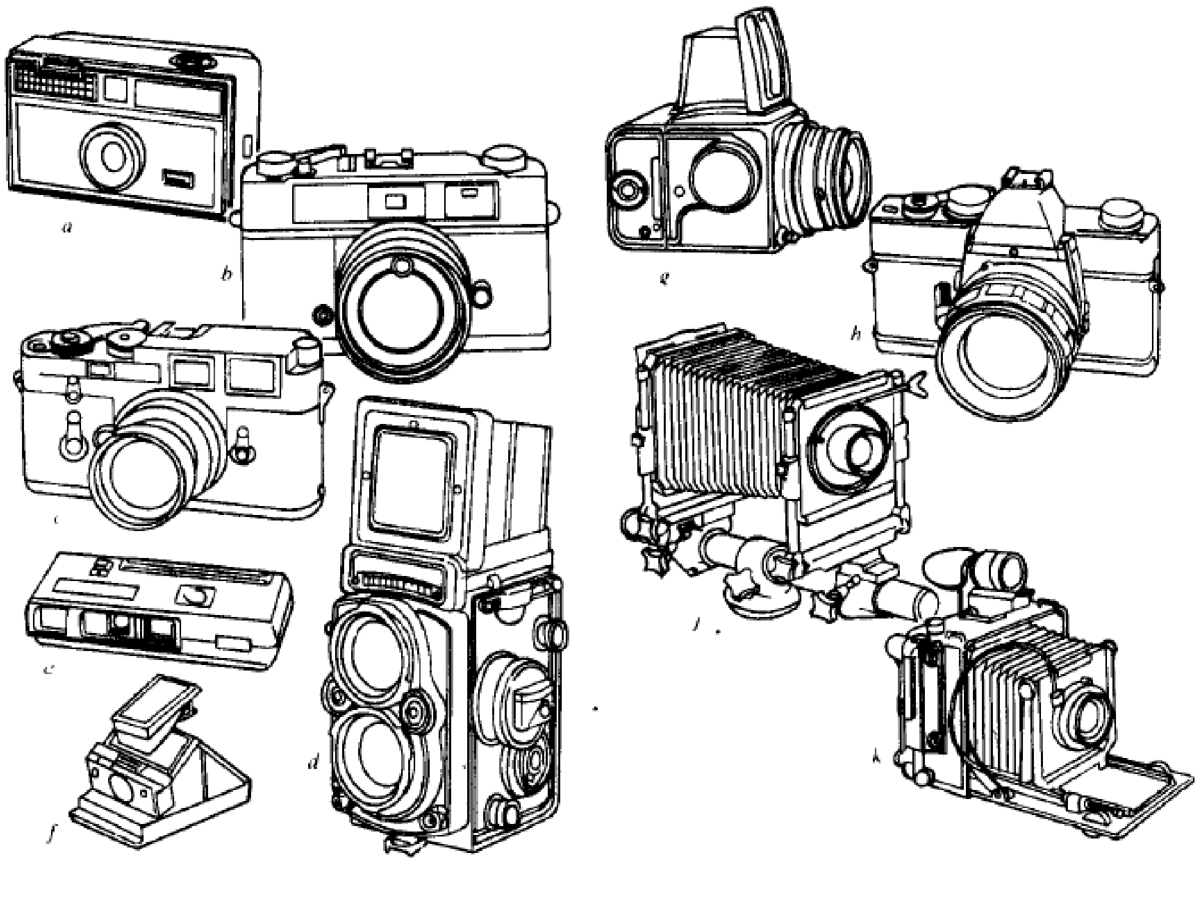


图 2-1 普通照相机的主要类型

图 2-1(a)～(c)是三种平视式照相机。其中图(a)是最简单的廉价相机。镜头是简单的一组双胶透镜甚至是个单透镜。光圈一般也很小,只有 $f/11$,有的可以缩小一或二档成 $f/16$ 或 $f/22$,并且一般不注光圈大小而用天气符号或图案来代替。对焦距离为固定不可调,一般装定在超焦距[①]上,因此一般可以拍摄得到距离从 2 米至无穷远处景物的清晰影像。稍好一些的相机可以作近景、中景、远景三档对焦,它们的对焦范围一般分别为 1～2 米、2～8 米和 3 米至无穷远。相机上也不注距离读数而只用符号或图案来表示。这类相机的快门一般为二片式镜头快门,只有二种曝光时间,即 1/40 秒和 B 门。多数这类相机配有内装式闪光灯。这类简易相机中曾使用过各种尺寸的胶卷,目前市售的一般都用 35 毫米的胶卷。

① 详见第八章。

图 2-1(*b*)和(*c*)都是目前使用较多的小型照相机，两者的差别仅在于图(*b*)的为固定镜头，图(*c*)的则为可更换镜头。它们的取景系统同时与测距、调焦机构相结合(因此也称之为 RF 照相机，Rangefinder camera)，它的工作原理将在第七、八章中详细讨论。

平视式照相机的机身体积小、重量轻，便于携带，使用方便，价格也比较低廉，因此很适宜于业余爱好者及家庭使用。平视式照相机采用 135 胶卷(35 毫米)。

图 2-1(*d*)是所谓双镜头反光式照相机，采用 120 胶卷拍摄 12 张(或 16 张)较大幅面的照片。这种相机的结构和工作原理如图 2-2 所示。这种相机本来有像幅大、不必放大的优势，但现已因彩扩机的普及，这一点已无优势可言。而它的体积大而笨重，携带、使用(取景时左右相反)都不方便，一卷胶卷又只能拍得 12 张(或 16 张)照片等缺点，现已处于被冷落的境地。

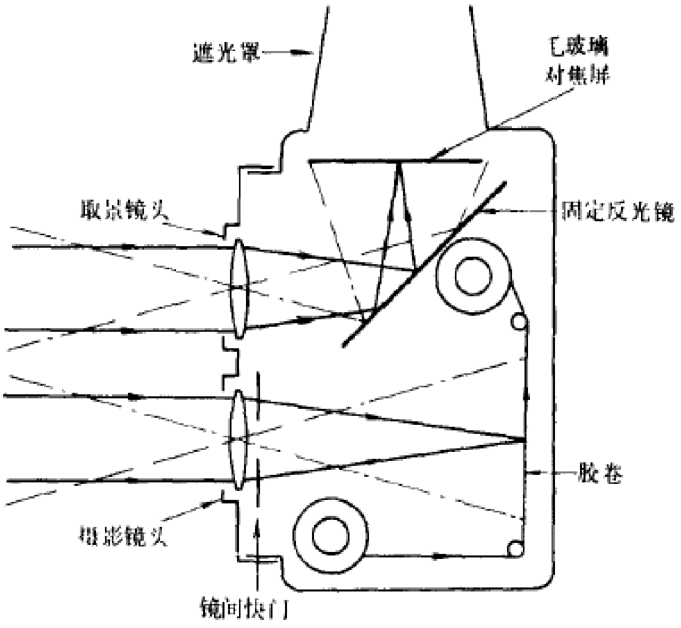


图 2-2 双镜头反光式照相机原理

图 2-1(*e*) 是使用 110 胶卷的便携式相机，它的唯一优点是体积小巧，可放在口袋里携带。在国外曾在一定范围内流行，在我国则基本未推广应用过。

图 2-1(*f*)是我们在第一章中介绍过的一步照相机。

图 2-1(*g*)是采用 120 胶卷的单镜头反光式照相机(简称单反相机，内部光路见图 2-3)，这类相机是专业新闻工作者喜用的高级相机。它有这样一些优点：可更换不同焦距的镜头；镜头兼作测距和拍摄，因此无取景视差；采用中心快门，无顺序曝光产生的影像畸变(适宜拍摄动态目标)；还可更换暗盒(俗称后背)，对不同景物可采用不同的胶卷。因此适合于更广泛的拍摄任务。

图 2-1(*h*)是采用 135 胶卷的单镜头反光式照相机。这是一类更为普遍被采用的单镜头反光式照相机，一般提起单反相机(SLR 相机，Single-lens reflex camera)，多指的是这一类。这类相机一般都采用焦面快门，曝光时间可以短到 1/2000 秒甚至 1/4000 秒。它的光路如图 2-4 中所示。

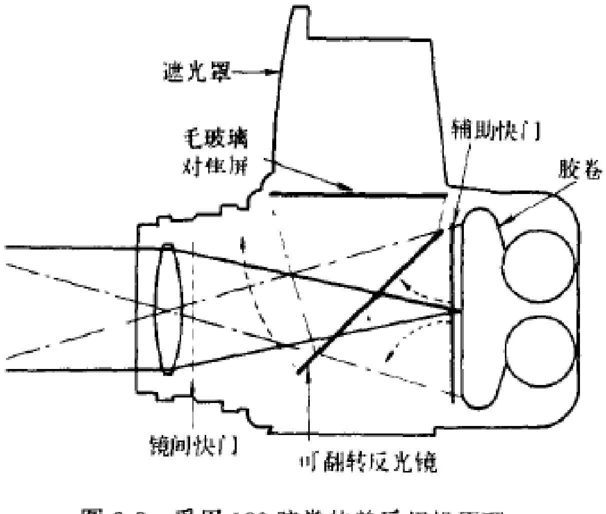


图 2-3 采用 120 胶卷的单反相机原理

最后，图 2-1(j)和(k)是两种大幅面的新闻相机，两者的主要差别在于，图(j)中的相机安装在单根导轨上，而图(k)中的相机的底板可以折叠。这两种相机以前都用作新闻摄影，故称新闻相机。现在记者使用的照相机已经小型化了。因这种大画面相机仍然广泛用于艺术摄影和技术摄影，故现在文献中都称之为技术照相机(Technical camera)。

随着电子技术的发展，照相机的结构愈来愈向电子化和自动化的方向发展，使用照相机 能够更加方便可靠地得到满意的照片。关于普通照相机的发展概况，读者可以参看参考文献[24]中的§1-3，这里就不再详细讨论。

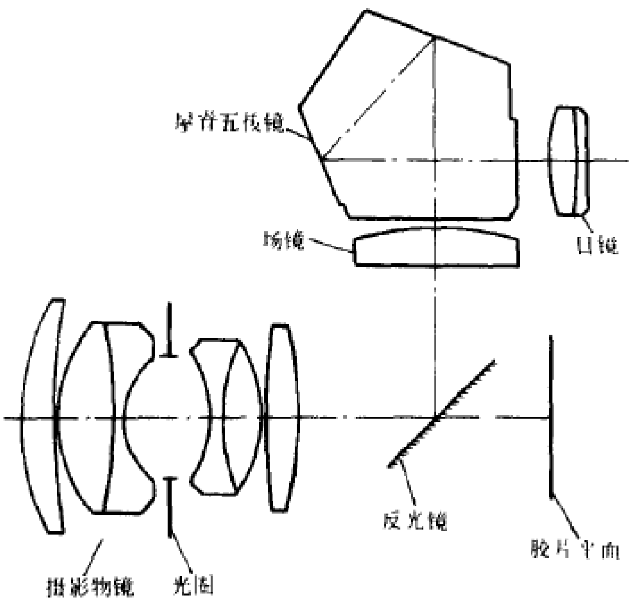


图 2-4　采用 135 胶卷的单反相机原理

§2-3　地面远程摄影仪器

在一般摄影中，为了获得远景的特写照片，可在那些可更换镜头的照相机上，配用固定焦距的长焦距摄远物镜，或是焦距可变的连续变倍镜头(Zoom 镜头)。一般摄影用的长焦距镜头，焦距一般不超过 200mm，也有更长焦距的，例如日本尼康(Nikon)公司的 Nikkor 镜头系列中，固定焦距镜头的焦距，透射式的可达 1500mm，反射式甚至可达 2000mm，Zoom 镜头中则有 360～1200mm 的。

用普通相机(例如单反相机)的机身配以长焦距镜头虽然能够用以拍摄远距离的目的，但是由于像幅尺寸很小(135 胶卷的像幅为 24mm×36mm)，不能满足军用侦察的要求。因此往往需要专门设计大像幅的远程摄影机。图 2-9 中便是两种专为我国边境线上用于侦察监视对

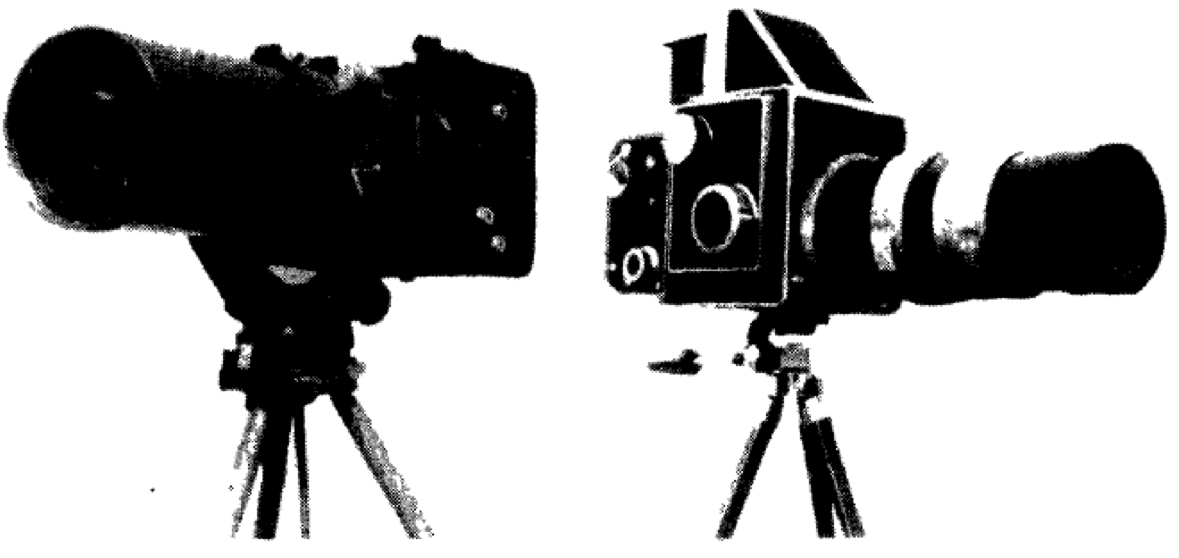

(a)　　　　(b)

图 2-5　大幅面远程摄影机

方而设计的大幅面远程摄影机。图(a)为 3m 焦距远程摄影机，像幅尺寸为 130×180mm^2，每次装片量可达 10m，物镜采用折反射光路(如第三章表 3-13 所示)，使镜筒长度只有 1m，大大减

轻了这种超长焦距摄影镜头的体积和重量。图(b)则为 1m 焦距远程摄影机，采用 120 胶卷，像幅尺寸为 $60\times60mm^2$。

侦察的目的，除了发现目标以外，还需要能根据摄得的照片确定目标的坐标，或是了解整个侦察地带的全面情况。因此，地面远程摄影机一般都考虑备有确定方向和高低的测角机构(参见图 2-6)，在所摄得的相片上还记录有测角分划网和距离分划网。

地面远程摄影也是一种重要的科学试验手段。借助摄影，可以研究炮弹弹道、确定爆炸威力以及研究发射炮弹对火炮性能的影响等。

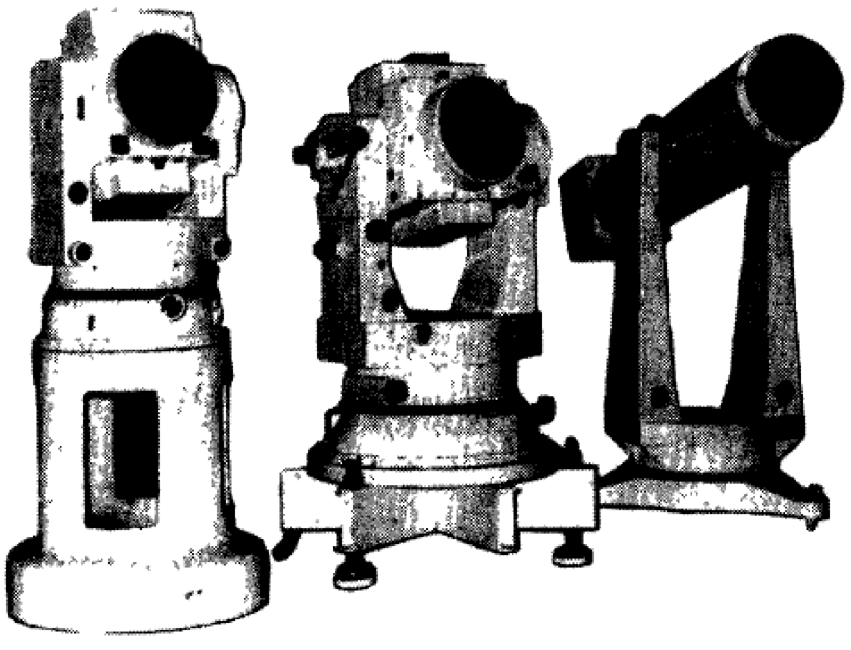


图 2-6 DX 系列弹道相机测量系统

图 2-6 是在靶场试验中用的远程摄影记录设备—我国设计生产的 DX 系列弹道相机测量系统。DX 系列弹道相机是高精度光学摄影系统，它可以对空间飞行的自发光目标飞行轨迹进行光学精密测量，并用于对靶场试验基地的无线电设备(如雷达)及光测设备(如电影经纬仪)作精度校准及精密大地测量。

在靶场试验仪器中，除了固定幅面的远程摄影机外，还有一类能作精密跟踪的大型摄影记录仪器，叫摄影经纬仪或电影经纬仪。

图 2-7 是我国设计生产的 STT-1 超级跟踪经纬仪。它可用来观测、测量空间飞行体的轨迹、姿态及遭遇参数。仪器具有红外、电视、激光三种自动跟踪测量及激光测距分系统，并装有两个(高低、方位)21 位高精度轴角编码器，一台 200 帧/秒间歇式同步高速摄影机。仪器采用微机控制，操作简便，自动化程度高，稳定可靠，并具有实时输出。

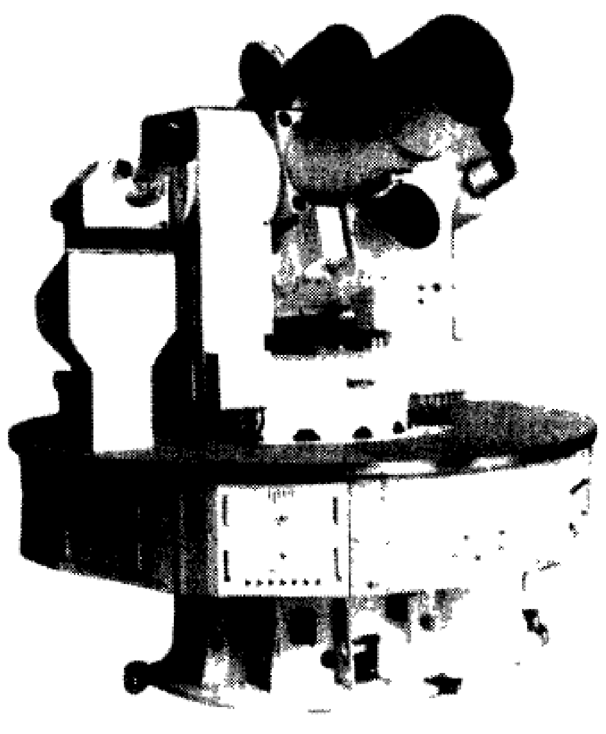


图 2-7 STT-1 超级跟踪经纬仪

需作精确定位的摄影，不但是军事侦察和靶场试验的一种重要手段，也是地形测量

中的一种重要方法，地面摄影测量学已经成为地形测量学科中的一个重要分支。地面摄影测量所用的设备，也叫摄影经纬仪，为了便于携带到野外去工作，它比起前面靶场中的同名设备来说，当然要轻便简单得多。例如蔡司 Photheo19/1318 型地形摄影经纬仪，全部装备重量为 63kg，摄影镜头的焦距 19cm，像幅尺寸为 $13\times18cm^2$。由于它的任务是作地形测量，因此对镜头的畸变提出了严格的要求（不超过 $\pm6\mu m$）。

§2-4 航空摄影机

按照中国大百科全书航空航天卷上的定义，航空指飞行器在地球大气层内的航行活动，航天指飞行器在大气层外宇宙空间的航行活动，航空相机也解释为安装在航空器上对地面摄影的精密光学仪器。因为用于航空器（飞机、直升机、气球、火箭等）上的摄影仪器，同用于航天器（卫星、宇宙飞船、空间站等）上的摄影仪器从原理上来说极为相似，因此我们在这里讨论的航空摄影机原理同样适用于航天摄影仪器。

航空摄影在军事上、科学领域里以及国民经济各部门中获得极其广泛的应用。它的重要作用在于，可在较短时间内提供大量客观的地面素材，为进一步的工作创造极为有利的条件。航摄照片可供许多领域使用，例如：测制地形图，提供地质调查资料，森林资源调查，城市设计和改建，铁路、公路等交通线的勘查，水利工程的修建，农田建设的规划，军用侦察乃至考古研究等等。

航空摄影的工作原理和一般摄影一样，也是在感光层上构成光学的影像。但是由于工作环境和条件不同，还有它本身的一些特点，其中主要的有：

(1)航空摄影是从一个非刚性的“基地”上进行的。除了这个基地（飞行器）本身是运动着的（运动的速度甚至很高）以外，由于大气的扰动及本身的工作，它还不断地经受着随机的振动和晃荡。

(2)在拍摄的对象（地物）和摄影系统之间有着相当厚的一层大气，这层大气具有散射光的性质，并且这种散射带有十分明显的光谱选择性。

(3)从很高的高度摄影时，如无特殊措施，摄影系统是在低温和低压的条件下工作的。

(4)同时，由于高度很高，被摄物体的像的尺寸很小。

(5)航空摄影的结果，拍摄过的摄影材料一般数量很大（特别是摄影测量制图作业），对材料处理的质量要求很高，完成期限要求很短，冲洗加工工艺必须考虑这些要求。

这些特点，使得航空摄影机必须具有与一般摄影机不同的一些特殊结构和系统。

从工作原理来说，目前采用的航空摄影有以下三种类型：分幅摄影、全景摄影和缝隙摄影。

2-4.1 分幅摄影

分幅摄影就是我们日常熟知的摄影方法。摄影机的镜头将我们选定的景物的像成在一幅胶片的全部面积上。

分幅航空摄影机的基本组成大致可以分成三个大部分（图 2-8）：航空摄影机本身 Ⅰ，航空摄影机的座架 Ⅱ 和操纵器 Ⅲ。航空摄影机 Ⅰ 大致上又可分成暗盒 1，镜箱 2 和镜筒 3 三部分。它的组成内容，除了和一般摄影机一样有镜头、快门、光阑、压板等各种结构以外，从航空摄影的特殊条件出发，还可能有各种特有的结构，例如：像移补偿机构、光度测定系统、曝光自动调

节系统、速度高度比率测定系统、摄影周期自动调节系统、光电启动装置、自动调焦系统以及控制整个摄影机按一定程序自动工作的分配机构等。座架是摄影机和飞行器之间的中间环节，它的作用是使摄影机保持在要求的空间位置，并消除或减轻一切有害的外界干扰。操纵器的作用是远距离操纵摄影机的工作。

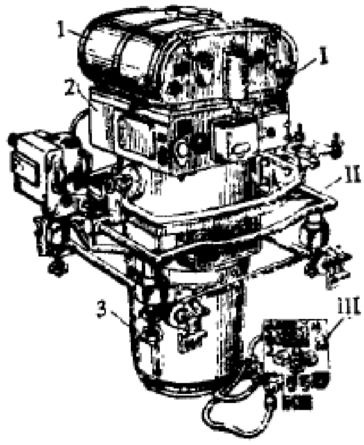
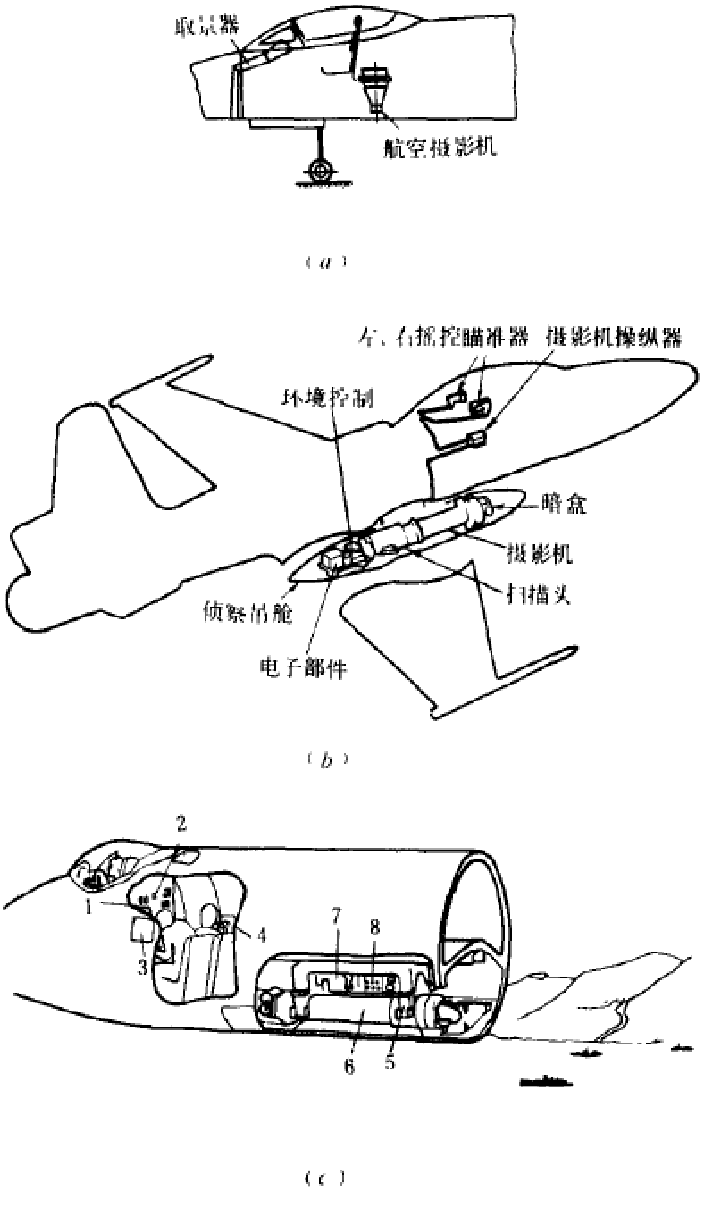


图 2-8　分幅航空摄影机的基本组成

航空摄影机在飞机上的安装位置，也随着使用目的的不同而不同。用于测地制图的航空摄影机一般由照相员操作，照相员通过取景器来观察地面，并通过操纵器控制摄影机的工作。图 2-9 是几种侦察摄影机的布置方式。图(a)中是一种立式侦察摄影机的布置方式，取景器的毛玻璃观察屏设放在驾驶舱内。图(b)和(c)是一种长焦距(1676mm)卧式侦察摄影机的布置方



1－操纵面板　2－摄影机温度指示器　3－左遥控瞄准器　4－右遥控瞄准器
5　摄影机座架被动隔离器　6－KS－146A摄影机　7－热系统　8－电子部件

图 2-9　几种侦察摄影机的布置方式

式，图(c)是安装在机身内的情形，图(b)则是安装在机身外悬挂的专用照相吊舱内。分幅摄影可以完成单张摄影、航线摄影和地区摄影等不同的任务。所谓单张航空摄影，指的是对单个目标拍摄数量有限的航空相片。它的主要对象是城镇、桥梁、渡口、机场、火车站、港口、基地、导弹发射场、海中的船只以及其它小面积的目标。航线摄影则是指沿着规定的航线飞行，对航线下的某一地带连续进行拍摄。地区摄影用于绘制大面积地区的地图或是侦察大面积地区的敌方军事布署，它由敷设多条平行的航线来实现。

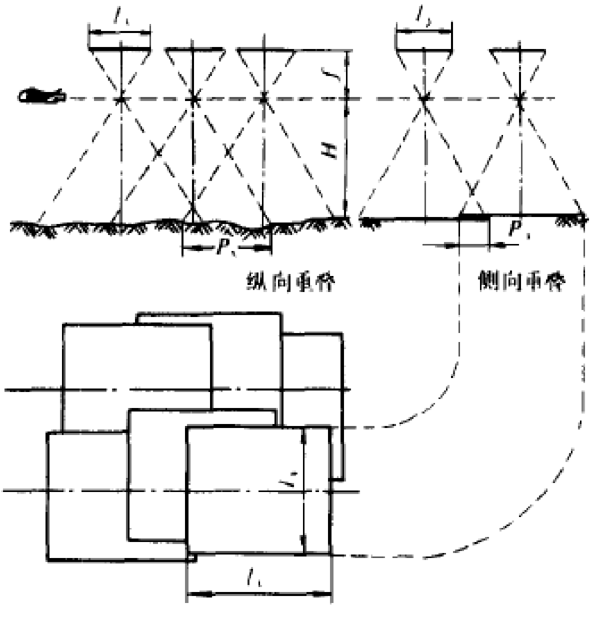


图 2-10　航线摄影中的纵向重叠和侧向重叠

在航线摄影中，为了避免漏掉目标，前后相邻两相片所拍地面景物应有一定的重叠。这种重叠(称为纵向重叠或航向重叠)对用作立体判读或测图的像对来说，尤为需要。类似地，在地区摄影中，相邻航线相片之间也应有一定的重叠，这种重叠则称为侧向重叠或旁向重叠。

由图 2-10，纵向重叠率 k_x 和侧向重叠率 k_y 分别为

$$k_x = \frac{P_x}{L_x} \times 100\%, \qquad k_y = \frac{P_y}{L_y} \times 100\% \tag{2-1}$$

换算到像幅上来，重叠率也可写成

$$k_x = \frac{p_x}{l_x} \times 100\%, \qquad k_y = \frac{p_y}{l_y} \times 100\% \tag{2-2}$$

式中 l_x，l_y 为相片的边长，p_x，p_y 为相片上景物重叠部分的长度，它们和地面景物之间的关系分别为

$$\left.\begin{aligned} l_x &= L_x \frac{f}{H}, \qquad l_y = L_y \frac{f}{H} \\ p_x &= P_x \frac{f}{H}, \qquad p_y = P_y \frac{f}{H} \end{aligned}\right\} \tag{2-3}$$

式中 f 为镜头焦距；H 为飞行高度。

当飞行高度 H 和地速 W ①为一定时，相邻两个幅面的曝光的时间间隔决定于纵向重叠率，它可由下式计算

$$T = \frac{L_x - P_x}{W} = \frac{L_x(1 - k_x)}{W} = \frac{l_x(1 - k_x)}{W}\frac{H}{f} \tag{2-4}$$

由(2-3)式有

$$\frac{l_x}{L_x} = \frac{f}{H} = \frac{1}{m} = M \tag{2-5}$$

$1/m$ 称为航摄相片的主比例尺(或平均比例尺)，一般就简称为比例尺。这是因为只有当地面为一绝对平的水平面以及摄影机的光轴垂直地面时，(2-3)式和(2-5)式才成立。实际航空摄影中上述条件并不存在，相片上各点的比例尺实际上是不相同的。为了便于工作，我们选择位于平

① 飞机的地速是指飞机相对于地面的速度，它是飞机本身的飞行速度(叫空速)和风对飞机的作用速度(叫风速)的合成结果。

均高程的平面(称为主水平面)作为物平面,它的高度作为计算比例尺的高度 H,这样计算得到的比例尺,在垂直摄影时,基本上代表了该相片的比例尺。

垂直摄影(或平面摄影)指的是航空摄影机的光轴基本处于垂直位置的摄影。允许偏离垂直位置的大小与摄影目的有关,测地制图要求不大于±3°,侦察摄影允许大到±25°。倾斜角超过垂直摄影规定的航空摄影叫做倾斜摄影(或透视摄影)。

倾斜摄影所拍得的照片比垂直摄影照片要更符合一般的透视习惯,所以更容易判读一些。此外,对于侦察摄影来说,倾斜摄影还有这样一些特点:能够拍摄较大的地区;可以远离拍摄对象的上空进行拍摄(这在敌方地区具有强大高射炮兵以及低云层的情形显得特别有利,在边境上空还可不越出国境取得敌方的布署情报);可以发现用水平面复盖来伪装的目标等。

倾斜航空摄影的主要缺点是:有不能通视的地段。另外,在倾斜摄影得到的照片上,像的比例尺由前景至后景逐渐缩小,因此从照片上测量目标大小和距离就需要经过比较复杂的计算。同时,这种照片有相当大一部分的面积由于比例尺太小而不能用来进行调绘。

倾斜航空摄影可以分前(后)倾和侧倾两种。侧倾航空摄影主要用来扩大一次进入所能拍摄得到的横向地面面积(叫做横向覆盖)。前倾航空摄影机常用在攻击侦察机上。

2-4.2 缝隙摄影

在分幅摄影的航线摄影中,航线上相邻两幅照片曝光的时间间隔与飞机的飞行高度和速度有关。飞行高度愈低、速度愈快,对于满足一定重叠率的要求来说,这个时间间隔就愈短(见 2-4 式)。在两次曝光之间的这段时间内,摄影机必须完成为拍摄一张照片所需的全部动作(例如抬起压板松开胶片、卷过已曝光的胶片、重新压紧胶片、上紧快门等)。在低空大速度的情况下,航线上两次曝光之间的时间间隔可能很短(达零点几秒),这就给分幅航空摄影机的结构设计带来了很大的困难。为了解决这个矛盾,提出了一种缝隙摄影的原理。

缝隙式航空摄影的原理是(图 2-11 和图 2-12):将飞机下方移动着的地物逐条地不间断地拍摄到卷动着的胶片上。

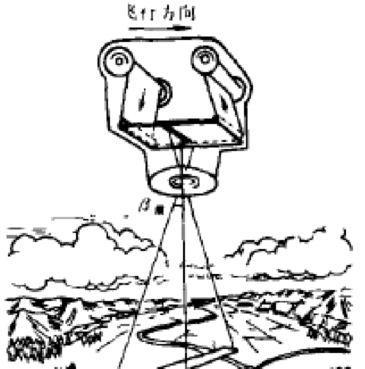


图 2-11　缝隙航空摄影示意图

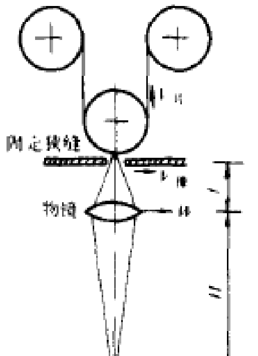


图 2-12　缝隙航空摄影原理

在物镜的焦平面处(紧挨在胶片前面),有一个与胶片卷动方向垂直的固定狭缝,它的宽度可以调节。地物通过物镜所成的像,只有一个狭条通过此狭缝落到胶片上,使胶片曝光。缝隙航空摄影机中没有其它的快门,也就是说,在全部摄影时间内,快门始终是打开着的。这样,为了连续不断地记录下地物的影像,胶片必须连续不断地卷动。由于摄影是连续进行的,因此不

存在机构工作对时间间隔的限制。

为了保证像的清晰，胶片卷动的速度必须等于像在胶片平面上移动的速度，它等于

$$v_{片} = v_{像} = W\frac{f}{H} \tag{2-6}$$

缝隙相片上每一个点的曝光时间决定于狭缝宽度 z 和卷片速度 $v_{片}$

$$t = z/v_{片} \tag{2-7}$$

由于 $v_{片}$ 不能随意改变，因此曝光时间由改变狭缝宽度来调节。狭缝宽度调节范围可由零点几毫米到几毫米。

缝隙航空摄影的一个主要特点是，它的照片在飞行方向和横向（狭缝长度方向）是两种投影。在狭缝长度方向，它和普通的分幅照片一样（相当于一张宽度为 z 的分幅照片），是地物的中心投影，像的大小随地物与摄影机之间的距离而不同，即不同距离的地物像的比例尺不同[见(2-5)式]。但在飞行方向，它却是一个缩小了固定倍数的垂直投影。地面上以速度 W 移过的长度被记录在以速度 $v_{片}$ 移过的一段胶片上，因此它的比例尺为

$$1/m = v_{片}/W \tag{2-8}$$

由于胶片只能以一个速度移动，因此，在这个方向上，所有不同高低的地物都以同一个比例尺记录在胶片上。

图 2-13(*a*)是垂直分幅照片上的图像，它的透视感是由物体处于不同高度的细节所引起的。这个景物在缝隙摄影时就成了(*b*)图中的图形，这时如设卷片速度是按房顶离摄影机的距离 $H_{顶}$ 来确定的，即 $v_{片} = Wf/H_{顶}$，于是有

$$(1/m)_{纵} = (Wf/H_{顶})/W = f/H_{顶}$$

即对于房顶来说，$(1/m)_{纵} = (1/m)_{横}$，影像没有变形，但对其它高度的细节来说，显然纵向和横向的比例尺不相同。例如，对于地面来说

$$(1/m)_{纵} : (1/m)_{横} = (f/H_{顶}) : (f/H_{地}) = H_{地}/H_{顶}$$

于是影像有了变形。

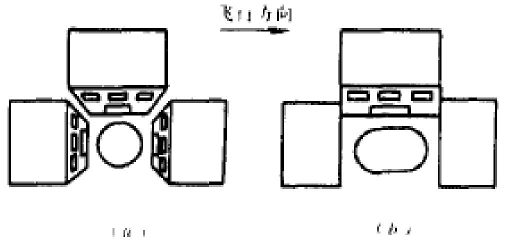


图 2-13　解释缝隙摄影双重投影的例子

除了上面所说的这种双重投影以外，缝隙摄影所拍得的照片，还往往有两种变形：一种是实际摄影时 $v_{片}$ 不可能精确与 W 相协调而造成的 $(1/m)_{纵}$ 的变化；另一种是由于摄影中航线不能保持笔直，以及飞机会有随机的倾斜等原因而使照片上的影像不能正确反映地面真实的位置关系。

缝隙摄影由于拍得的是一条连续不分幅的长条照片，有的书上也把它叫做条带摄影。

2-4.3　全景摄影

全景航空摄影的发展和应用，主要是出于扩大拍摄范围的需要。在分幅摄影中，为了扩大横向拍摄范围，可以采用增大物镜视场角的办法，即采用各种广角镜头。但是，用广角镜头所拍照片的质量很难保证均匀优良。广角镜头的分辨率，随着像场角的增大而迅速下降。许多像差，对广角镜头来说都比窄角镜头难控制得多。相片上的各部分的像的照度也随着像场角的增大而迅速下降。广角镜头的加工和装配也要复杂得多。此外，在相片幅面大小一定的情况下，广角镜头的焦距也相应地要缩短。因此，为了即保持极高的分辨率水平，而又同时要扩大拍摄范围，需要采用其它的办法。

一种办法是多航线的分幅摄影。例如用三部窄角航空摄影机(图 2-14),一部居中,光轴垂直向下,两部在其左右两侧,光轴倾斜一定角度,就能够摄得从地平线到地平线的拍摄范围(图 2-15)。这种多航线的摄影也可以用一部光轴可作左右摇摆的分幅摄影机来完成(图 2-16)。

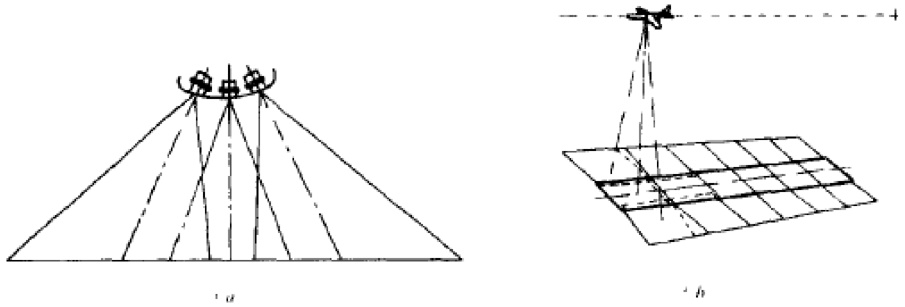


图 2-14　配置多部摄影机的多航线摄影

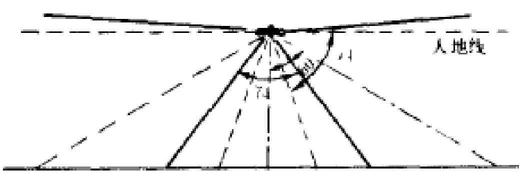


图 2-15　多航线摄得从地平线到地平线拍摄范围

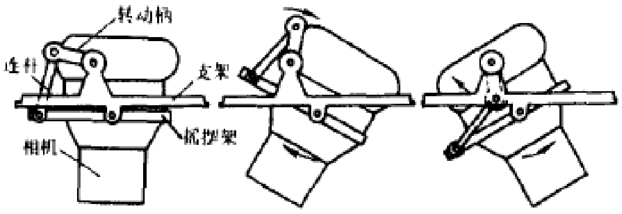


图 2-16　摇摆摄影

这种方法的缺点是需要多部摄影机或特殊的摇摆机构,结构显得笨重复杂。

图 2-17 是一种横卧式侦察航空摄影机的局部外形,它的头部(内有镜头和使光轴折 90°角的反射镜)可以左右摇摆。这种摄影机所拍得的各条航线的地面面积,如图 2-18 中所示。

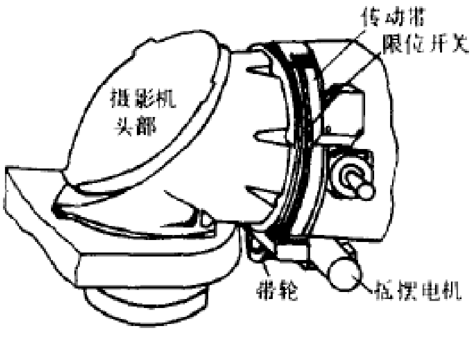


图 2-17　横卧式侦察航空摄影机头部的摇摆机构

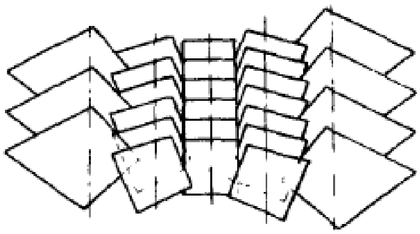


图 2-18　用图 2-17 中的摄影机作多航线摇摆摄影的地面拍摄范围

全景摄影(或称周视摄影),解决了相机结构复杂程度和横向拍摄范围之间的矛盾。

全景摄影,也可以说是一种缝隙摄影,只是它的狭缝方向与飞行方向一致。摄影时,镜头的光轴从一侧到另一侧扫过所拍摄的地形,从而获得很宽的拍摄范围。曝光时间的长短由改变狭缝宽度来调节。在航线摄影时,同样需要根据要求的航向重叠率来确定两幅全景相片之间的时间间隔(图 2-19)。

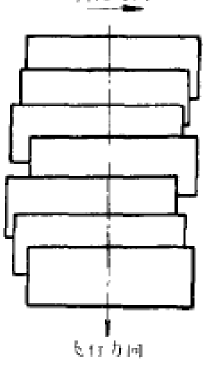


图 2-19　航线的全景摄影

全景摄影中光轴的扫描,可以用旋转镜头(和狭缝)直接扫描的方法,如图 2-20(a),这时胶片逐幅卷动,也可以用其它辅助光学零件扫描的方法,如图 2-20(b)中是一块立方棱镜,这时胶片在固定狭缝

后面连续不断地移动。

全景航空摄影照片上的图像会有以下几种畸变：

(1)全景畸变。我们把垂直全景摄影的物像关系画成如图 2-21 所示的情形。则水平地面上的物点 $P(X,Y)$ 在相片上的坐标 $p(x,y)$ 将为

$$x = \overline{np} = X \frac{f}{H/\cos\alpha} \tag{2-9}$$

$$y = \overline{an} = f\mathrm{arctg}(Y/H) \tag{2-10}$$

式中，$X = \overline{NP}, Y = \overline{AN}$。因此，如果我们拍摄布置在水平地面上的一个方形网格，并假定摄影时飞机不动，它的照片将成为图 2-22 所示的形状。显然，全景畸变是由于像比例尺随扫描角 α 的增大而减小所产生的。

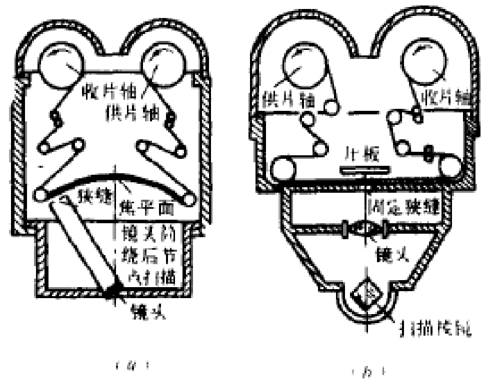


图 2-20　全景航空摄影机结构原理

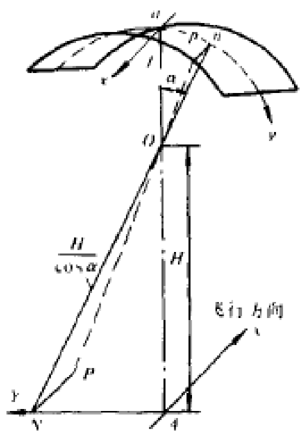


图 2-21　全景航空摄影的物像关系

(2)扫描畸变。航空全景摄影不同于地面静止的全景摄影的是，在整幅全景照片由狭缝逐条地曝光时，飞机是在不断地向前运动的。因此，在扫描过程中，地面上物体的像就会相对于胶片产生位移而变形。图 2-23 表示扫描畸变与全景畸变叠加的结果。

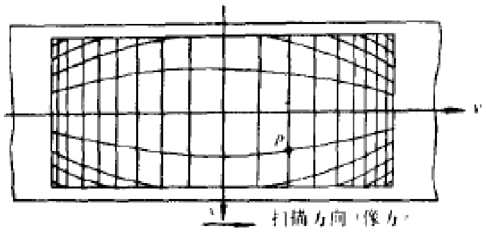


图 2-22　方形网格的全景畸变

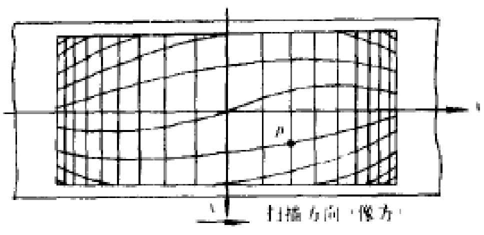


图 2-23　方形网格的扫描畸变

例如图 2-21 中的 P 点，当摄入时，其像点的位置已不在图中所画的 p 点，而要沿 pn 方向移过一个距离 x_p

$$x_p = - Wt \frac{f}{H}\cos\alpha \tag{2-11}$$

式中 t 是光轴从 A 点起扫描 α 角所需的时间。设扫描角速度为 ω，则有

$$t = \alpha/\omega \tag{2-12}$$

代入上式得

$$x_p = -\frac{Wf}{H\omega}\alpha\cos\alpha \tag{2-13}$$

(3)像移补偿畸变。像移是航空摄影中的一个特殊问题，这是因为装载航空摄影机的飞行器始终处于运动状态，而相片上任一点的曝光又不可能在一无限短的瞬间完成，因此像点在曝光过程中将沿着胶片移动。像移会使影像模糊。造成像移的原因很多，其中飞行器前进运动所造成的像移可以采用补偿的办法来消除或减小。随机的或周期性的振动则一般依靠摄影机在飞行器中的安装方法来消除或减轻。

多数全景航空摄影机都有像移补偿的系统，这是因为全景航空摄影机常用于低空大速度飞行的情形。

对于任一点 p 处的像移速度 $v_{像}$，由地速 W 很容易按比例得到

$$v_{像} = - W \frac{f}{H/\cos\alpha} \tag{2-14}$$

像移补偿速度 $v_{补}$ 应等于

$$v_{补} = - v_{像} = W \frac{f}{H}\cos\alpha \tag{2-15}$$

这样，由于补偿运动引起的任一点 p 的位移等于

$$x_{补} = \int_0^t v_{补}\,\mathrm{d}t = \frac{1}{\omega}\int_0^\alpha W \frac{f}{H}\cos\alpha \mathrm{d}\alpha = \frac{Wf}{H\omega}\sin\alpha \tag{2-16}$$

这个位移，就是像移补偿畸变。

还需说明一点的是，曝光狭缝有一定的宽度，狭缝内沿宽度方向各点的像移速度是不同的，而像移补偿机构一个瞬间只能实现一种补偿速度，因此，在狭缝宽度的像中只有一条与狭缝平行的像线的像移能够完全补偿掉，其余部分均有剩余像移。

合并以上三种畸变，$P(X,Y)$ 的像点 p 的坐标应当改写成

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{f}{H}X\cos\alpha - \frac{Wf}{H\omega}(\alpha\cos\alpha - \sin\alpha) \\ y &= f\mathrm{arctg}(Y/H) \end{aligned}\right\} \tag{2-17}$$

倾斜全景航空摄影照片中的畸变要更复杂一些，它还包括了光轴倾斜所带来的影响(图 2-24)。

由于全景照片的畸变很大，并且它的透视图形与一般视觉习惯差别较大，因此未经专门的训练，很难加以判读。为了从全景照片上测量地物的坐标，需要设计专门的纠正仪器或坐标网格。

高空摄影需要采用焦距很长的物镜，由于飞行器内空间高度有限，这种摄影机一般采用横卧式的结构。横卧式分幅航空摄影机的例子我们在前面已经谈及[见图 2-9(*b*)～(*c*)和图 2-17]。在横卧式全景航空摄影机中，胶片也是以与飞行方向平行的狭缝横向扫描逐条曝光的。图 2-25 所示为一种所谓光棒式(Optical bar)全景航空摄影机原理。由图可见，胶片表面并不如一般全景相机那样直接与物镜光轴垂直，而是经过一块反射镜将光轴折转 90°，焦面弧(胶片弧)的轴线就是物镜轴即光棒轴。光棒中包括前反射镜(对地扫描)、物镜和后反射镜(对胶片扫描)。作全景扫描时，它们作为一个整体绕物镜光轴旋转。由于焦面弧的半径只有物镜焦距的一半，因此曝光过程中胶片需作与扫描相反方向的拉动。当光棒的光线入射口从左侧水平位置逆时针扫描 180°转至右侧水平位置时，胶片正好拉过半个圆周长，即有两倍半圆长的胶片被曝光。光棒继续逆时针转 180°，这是非拍摄的半圈，胶片继续拉过半个圆周长，将已曝光的胶片全部拉出焦面区，作好等待下一次曝光的准备。光棒、狭缝以及胶片这种连续不间断的匀速运动，有利于减轻振动，避免断续运动中所固有的很高的加速度，还可降低对相机动力功率的

要求。

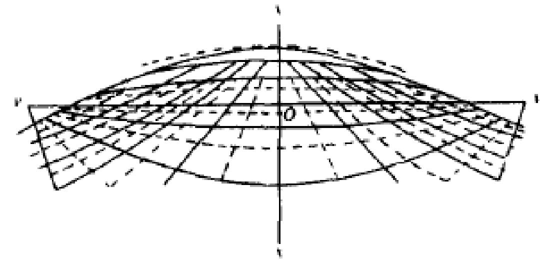


图 2-24 倾斜全景航空摄影中坐标网格的畸变

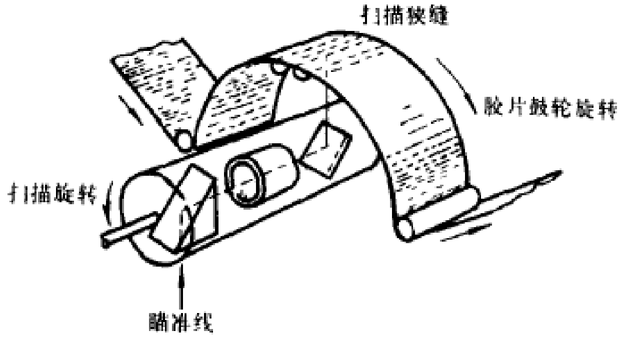


图 2-25 光棒式全景航空摄影机原理

§2-5 多谱段摄影系统

所谓多谱段摄影①,就是设法将被摄对象的光按波长分割成若干段,分别摄录下来。例如,在同一瞬间,用多部摄影机同时拍摄同一景物,在每一部摄影机里装了不同的胶卷,镜头上还加上了不同的滤光镜,使它们分别接受并记录景物送来的光中一个指定的很窄的谱段范围。得到的一组分谱段的底片,我们可以逐个谱段来研究所摄景物,或者将几个谱段的底片叠合起来构成假彩色的光谱带照片,甚至总合起来成真彩色照片来判读。这样,我们就有了更多的选择余地,能够识别出更多的目标信息来。

其实,最早出现的加色法彩色摄影,可以说就是一种多谱段摄影。它是利用分光装置使光线分别经过红、绿、蓝三种滤光镜后,使后面的胶片曝光。冲洗以后便得到了三张分光的黑白底片,将这三张底片放到三台幻灯机上,加上相应的滤光镜放映到屏幕上,就能合成一个彩色的像。因此,用这种分色底片投影合成彩色影像的方法,也就可以认为是多谱段摄影的最早应用之一。

从这种加色法到现在用的多层彩色胶卷,是彩色摄影的成功的飞跃。但是从多谱段摄影的观点来看,这样做却正好失掉了逐个谱段研究所摄信息的可能。

目前,多谱段航空摄影已经成为农林、地质地理、水文海洋等等许多领域中一种重要的研究手段,它也是军事上的一种重要侦察手段。

常规的多谱段摄影机是直接从一般的摄影机演进而来的。它大致可以分成下列三种基本类型:

(1)一种可称为多相机型(图 2-26),也就是由多部相机组合起来,同步地进行拍摄。每一部相机根据所确定的谱段选用合适的滤光镜和胶卷。

(2)一种可称为多镜头型,也就是由多个镜头(各配戴合适的滤光镜)配合同一个暗盒,在幅面较大的胶卷上同时拍摄一组不同谱段的像。图 2-27(*a*)是国产四镜头型地面多谱段摄影机,(*b*)是一种九镜头型多谱段航空摄影机。

多镜头型多谱段摄影机的优点是在一张胶片上同步拍摄到的不同谱段的影像能同时进行显影处理,并便于保存。实际上,由于胶卷感光特性的限制,当谱段取得比较多,范围较宽时,用一种规格的胶卷是不可能做到的,这时就需要采用几种规格的胶卷(例如全色片加红外片)。

① 最早的文献中不确切地把多谱段(multispectral)译成多光谱(这里 spectral 应是谱段或分谱的意思),现不少文献仍沿用这样叫法。由于英文或作 multiband,故也有不少文献按照无线电技术的习惯叫做为多波段。

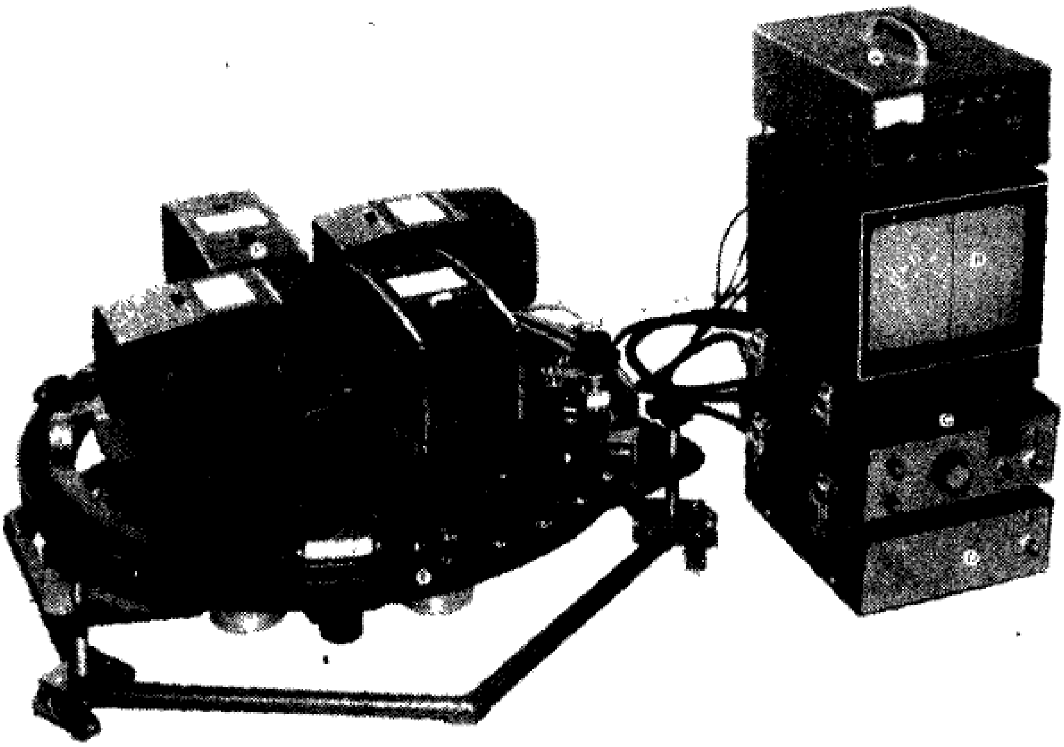
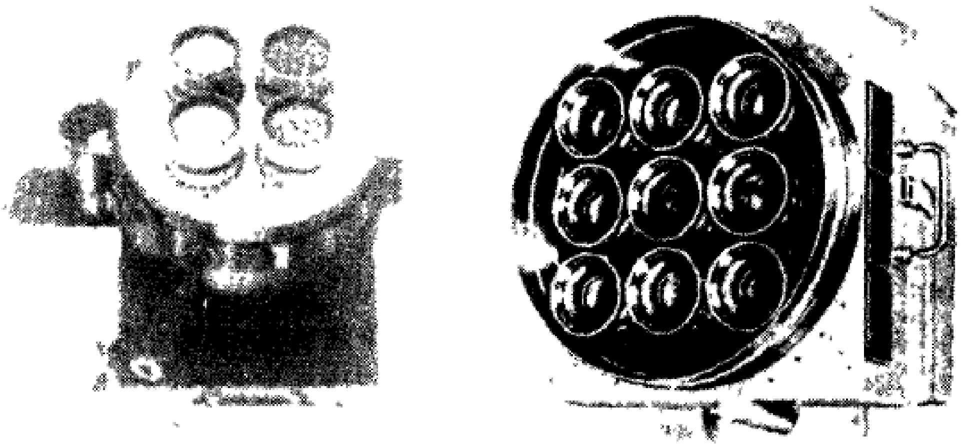


图 2-26 多相机型多谱段航空摄影机

A 操纵器　B CRT 取景器　C 自动间隔调节器

D 电源　E 座架　F 摄影机



(a)　(b)

图 2-27 多镜头型多谱段摄影机

(3)第三种可称为单镜头分光束型，它的结构原理如图 2-28 所示，光通过一个镜头，经照相机内的二向色分光镜分成几个谱段，拍出各谱段的黑白照片。

多谱段摄影所拍得的影像，既要用于单独的密度测量和判读，又要合成各种真假彩色影像来判读和测量，因此对它们的像幅上的照度分布和各像幅之间的重合精度都提出了很高的要求。从重合精度来看，单镜头型的相机最为有利，它免除了各相机之间的对准误差和快门工作的同步误差。但从各谱段影像的光能来看，单镜头型由于只有一种统一的快门速度和光圈，又显得局限性大一些。

多谱段合成照片的空间分辨率，在一组(例如三个谱段)分谱段影像精确重合时，由其中的最低分辨率来决定。反之，若三个分谱段影像的分辨率相同时(设均为 R)，则由于合成时的不

重合量 d(μm)，导致最后的合成分辨率 R_M 可按下式近似计算

$$R_M \approx R/(1 + 10^{-3}Rd) \qquad (2\text{-}18)$$

除了上面所说三类常规的多谱段摄影机外，还有其它的多谱段摄影机。例如，采用光学多路复用的系统。它是用不同方向的空间载波来调制目标的不同谱段的光波，然后，使这些被调制后的信号重叠在同一张黑白胶片上曝光。冲洗以后，当用适当方向的相应波长的光源去照射这张底片时，就能将该谱段的影像再现出来。

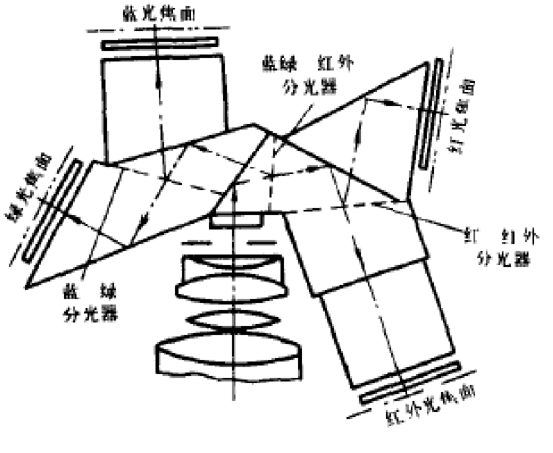


图 2-28 分光束型多谱段航空摄影机原理

采用胶片直接记录光学系统所成影像的多谱段摄影原理，有这样一些局限性：

(1)由于胶片感光性能的局限性，摄影系统可收集的电磁辐射谱段只限于可见区到近红外区。

(2)多谱段摄影系统各谱段图像间的配准受到很多因素影响而很难达到很高精度，例如各谱段物镜的光学性能(像差等)不一致、摄影时各光轴间的瞄准一致性等等。

(3)摄影系统采用胶片作记录，需要回收回来进行暗室内的显影加工处理，因此较难实现从空间实时获得地面信息。并且胶片不能重复使用，因此记录的信息有限，这一点对于空间(卫星)摄影来说，尤其显得不足。

因此，现在有一种所谓多谱段扫描仪(multispectral scanner，简称 MSS)在遥感中获得了广泛的应用(尤其是用于空间遥感)，它是利用分光装置(光栅或棱镜分光元件或是滤光镜)将从地面一个面元来的光线分解成光谱，然后用不同的探测器来接受不同谱段的信号，例如用光电倍增管接受可见光谱段信号，用硅光电二极管接受近红外(0.8～1.1μm)信号以及用碲镉汞接受较长波长(10.4～12.6μm)红外信号等。得到的电信号可以直接传输到地面，记录在磁带上，也可转换成光信号记录在胶片上。

图 2-29 是多谱段扫描仪系统工作的原理示意图。

由地面景物来的光线经扫描仪光学系统反射并聚焦后，由二向色性光栅分光，反射部分由棱镜(或光栅)分光后由多个[图(b)中画出的为三个]接受器接受，透射并衍射部分也由多个[图(b)中画出的为二个]接受器接受。经分谱段的接受器转换成电信号后，可用磁带记录下来。飞行中的扫描[由扫描反射镜，见图(b)]过程则如图(a)所示。

图 2-30 是美国陆地卫星(Landsat)上的 MSS 光学系统示意图，编号为 4、5、6、7 的四个谱段的光谱范围分别为 0.5～0.6，0.6～0.7，0.7～0.8 及 0.8～1.1μm。从第三颗陆地卫星起，还增加了一个编号为第 8 谱段的热红外谱段(图 2-47 中未示出)，它的光谱范围为 10.4～12.6μm。为了配合卫星绕地球的运动速度，使记录的地面信息不致有遗漏，探测器的安排是：4～7 谱段每个谱段各有 6 个探测器(即有 6 个点平行扫描)，8 谱段则只有两个探测器，以相应增大的像元尺寸(即降低的空间分辨率)扫描与 4～7 谱段相同的地面面积。

新一代的多谱段遥感器叫成像光谱仪(Imaging spectroscope)，它的像面接受器是二维的 CCD(Charge-couple device ，电荷耦合器件)面阵。进入遥感器的地面像元的光先用分光部件(光栅或分光棱镜)分解成光谱，落在焦面一行接受元件上。当这条光谱窄条在 CCD 面阵上扫描时，就相当于一台有若干个谱段的扫描仪。采用这种方法可以得到很窄谱段的信息，谱分辨

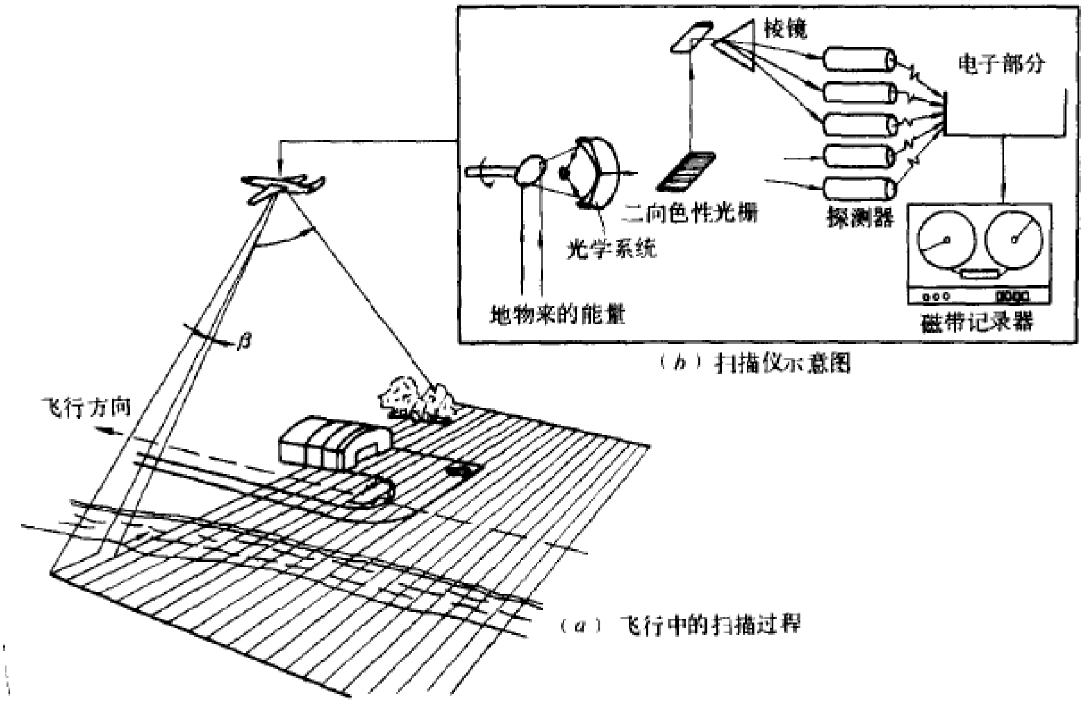


图 2-29　多谱段扫描仪工作原理

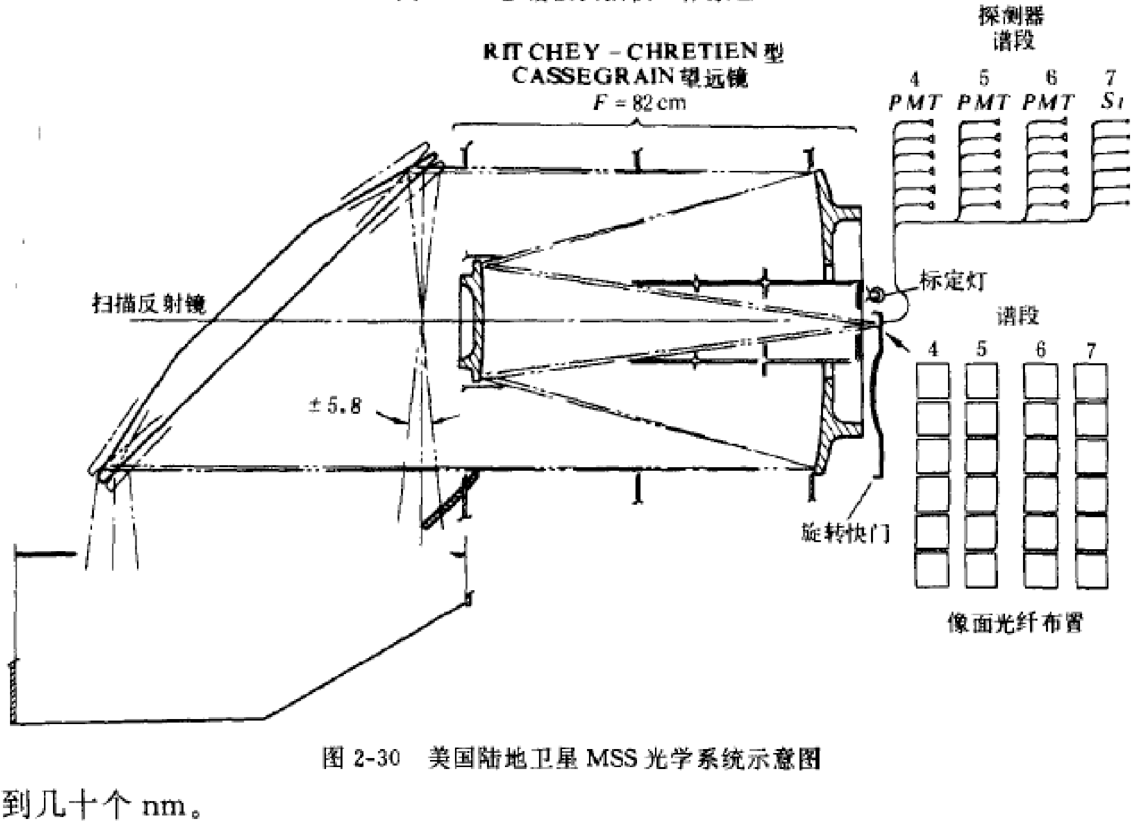


图 2-30　美国陆地卫星 MSS 光学系统示意图

率可小到几十个 nm。

§2-6　高速摄影机

高速摄影是研究高速流逝过程的一种重要方法，它能将人眼无法辨认的快速过程用照片的形式“凝固”下来，使人们有可能对现代的许多重要科学技术领域中的现象进行深入细致的观察研究和分析。因此，高速摄影技术已经成为科学研究和工农业生产中广泛应用的有效手段。同时，随着科学技术的发展，高速摄影技术本身也在帮助人们深入窥探各种高速现象的过程中得到了极大的发展，它的工作原理和结构已经远远超出了人们对一般照相机和电影摄影机的概念。

研究高速现象，有时只需要截取一张极短瞬间的照片，例如图 2-31 是螺旋桨设计过程中的风洞试验高速照片。有了这样一张照片，就可以了解螺旋桨后面形成的涡流情形（由喷射的烟流指示）。有时需要看到所研究高速现象的变化发展过程，例如图 2-32 中，一组不同时间相位的画面告诉我们脉冲灯的闪光是怎样产生的。

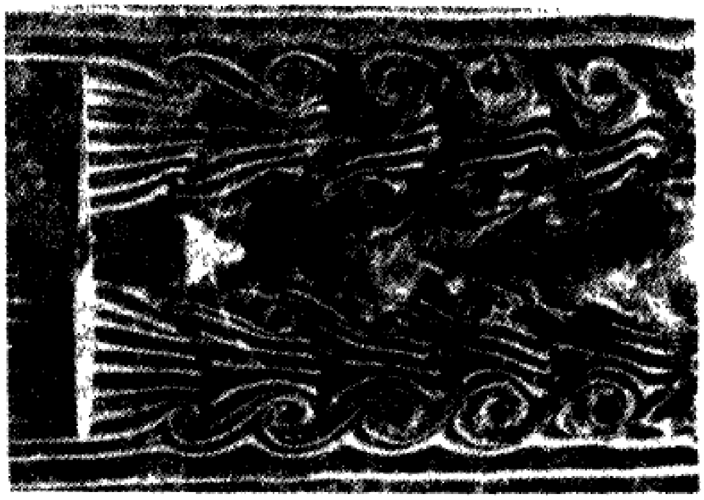


图 2-31　螺旋桨风洞试验高速照片

高速摄影的目的不同，实现它们的方法也就不同。

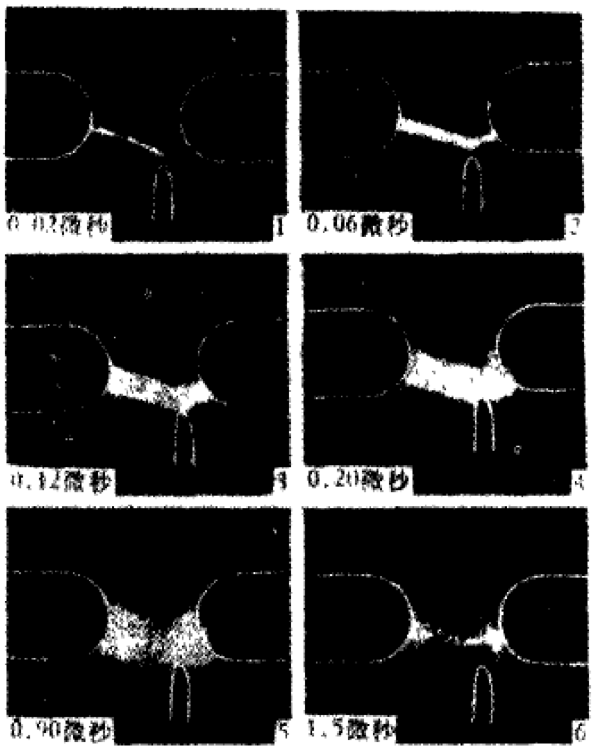


图 2-32　一组脉冲灯闪光的分幅照片

2-6.1　单幅高速摄影

单幅高速摄影的关键是如何获得一个极短的曝光以保证拍得影像足够清晰的照片。

对于不发强光的高速现象，可在背景很暗的条件下，让高速过程在快门打开着的摄影机前进行，用一次历程极短的强力闪光来照明。胶片的曝光时间也就取决于闪光的持续时间。常用的强力闪光有：火花隙放电、高速气体放电管和激光等。

火花隙放电和放电管的闪光持续时间可短到 0.1μs(10^{-7}s)，而激光的闪光时间可以缩短到 ps(10^{-12}s)的量级。

拍摄不发强光的高速过程，也可以在用一个持续时间较长的强光源连续照明下进行，这时胶片曝光时间需由高速快门来控制。这种情形就和拍摄本身发强光的高速过程相同。

一般摄影机中所用的机械式的快门（参看第五章），很难得到短于 1/1000s 的曝光时间，而且一般机械快门往往有较大的惯性，不能在一瞬时内启动。在高速摄影中通常采用两种几乎不具惯性的快门，一种叫做克尔快门，也叫电-光快门，另一种叫做电子光学快门。

克尔快门就是利用克尔盒来控制光线的通过。克尔盒（图 2-33）是这样的装置：在玻璃容器内装有一种透明的液体（常用的是硝基苯和二硫化碳，特别是前者），它在一般情况下是各向同性的，但当加以强电场时，就变成各向异性的了。在玻璃容器两端各安有一片人造偏振片。偏振面互成 90°。因此，将这样一个克尔盒挡在胶片前面的光路中时，它就像一个关闭着的快门。当加一强大电场在克尔盒内的两个平板电极上时，克尔盒内的液体变成了各向异性，它使通过起偏振片后的偏振光的偏振面发生旋转，不再与检偏振片的偏振面成垂直。这时，就相当于快门打开。一旦电场取消，克尔盒内的液体立即恢复成各向同性的，快门重新关闭。

采用一般电路得到的脉冲电场可短到纳秒级，也就是说用电驱动的克尔快门可得到短至 10^{-9}s 的曝光时间。用激光脉冲产生的电场来控制克尔快门（这种快门叫光驱动克尔快门），可以得到 10^{-10}s 甚至更短的曝光时间。

克尔快门的主要缺点是：分辨率低，通光效率低和由于所用液体对短波光的吸收强而限制用在较长波的摄影。

与克尔快门相类似的有利用晶体的法拉第快门（磁-光快门）和普克尔快门。

电子光学快门（图 2-34）是在一般的光电转换器（变像管）内加上了一对快门板，这对极板在正常情况下的电位，使阳极释出的成像电子束被偏转，不能通过孔径光阑板上的小孔。而当需要曝光时，只要使快门板上的电压变化到成像电子束的偏转角度恰巧能够通过孔径光阑板上的小孔，射到荧光屏上，使荧光屏上重现光学影像。用这种快门可以得到 10^{-12}～10^{-14}s 的曝光时间。

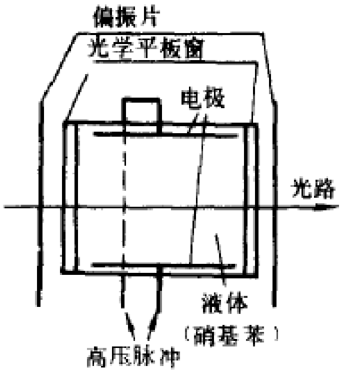


图 2-33　克尔盒结构原理

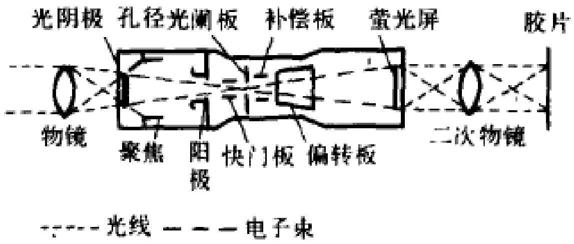


图 2-34　电子光学快门原理

电子光学快门的优点是：所需功率较小，曝光时间短和像的亮度可以增强（用多级装置可增大数千倍）；缺点是空间分辨率低（不超过 10 l/mm）。

一幅高速摄影相片记录下了高速现象的一段短暂过程，在这段短暂过程以内的变化全部重叠在同一张相片上，不能再分辨。这段时间就叫这张高速照片的时间分辨率。

2-6.2　连续高速摄影

连续高速摄影可以分成分幅连续摄影和轨迹记录摄影两种类型。分幅连续摄影把一个变化过程以一定的时间间隔逐幅地拍摄下来。表征这种高速摄影的一个特性参数是它的拍摄频率。轨迹记录摄影则是连续地不分幅地记录下高速现象的变化。图 2-35 是同时记录下的一个炸药柱爆炸过程的轨迹记录和分幅照片。上面的扫描轨迹图上记录下的是发光的爆炸前沿，横坐标是时间，下面的是对应各瞬间的分幅照片。相机的光路布置可以如图 2-36 中所示。

对于背景较暗、自身发强光的高速过程（例如拍摄火箭的飞行轨迹），可以采用一台快门始终打开着的摄影机，例如可用图 2-6 中的弹道相机，让火箭的亮像在底片上自己绘出它的轨迹。但是如图 2-35 中所记录的炸药柱的爆炸过程，就需要有其它扫描的措施，因为这类高速现象的变化表现为其体积的扩展，后一瞬间的像是重叠在前一瞬间的空间位置上的。

图 2-37 表示轨迹记录摄影的两种扫描原理。

分幅高速摄影可以采用各种不同的原理来实现，其中主要的有：重复单次摄影、高速电影摄影、鼓轮式高速摄影、转镜扫描型高速摄影、网格高速摄影以及应用光电转换器的高速摄影（变像管高速摄影），它们能够达到的拍摄频率，大致上按上列次序由低到高。

图 2-35 同时记录下的药柱爆炸过程的轨迹记录和分幅照片

(1)重复单次摄影。顾名思义是将一些单幅高速摄影装置组合起来,使它们顺次地工作。这种工作方式的优点是拍摄频率不必恒定,可按需要而适当安排;缺点是仪器设备复杂,而且幅数常由于空间的原因而受到限制。

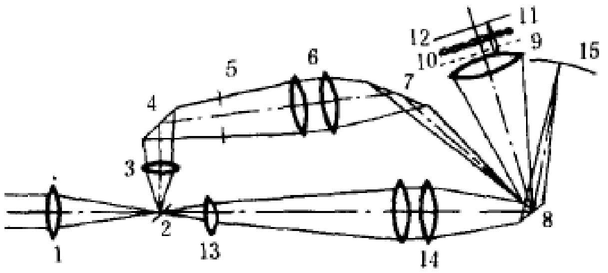


图 2-36 同时完成轨迹记录和分幅摄影的光路布置

(2)高速电影摄影。普通电影摄影机(图 2-38)中,胶片在片门处是断续地移动的,这

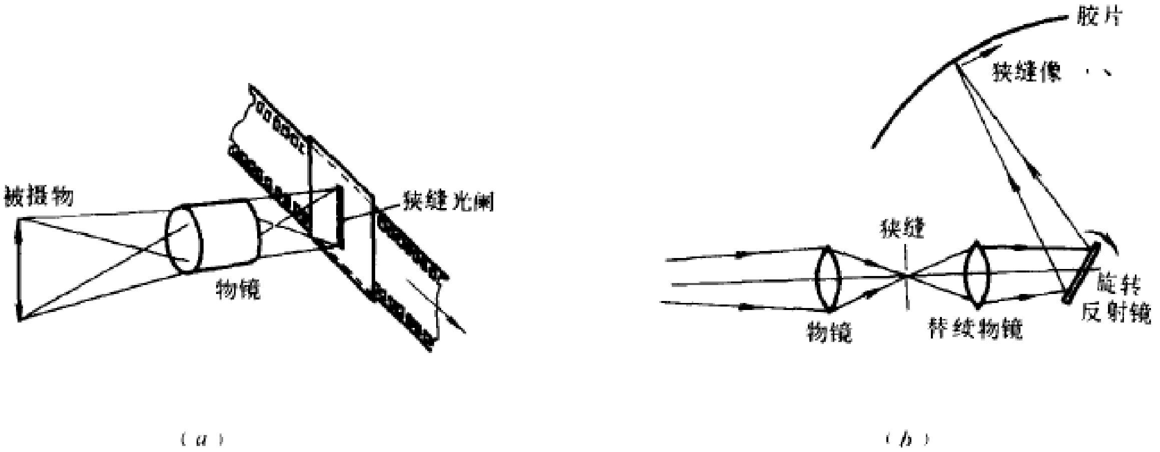


图 2-37 轨迹记录摄影的两种扫描原理

种间断运动依靠抓片机构来完成,它的标准频率是每秒 24 幅。由于这种间断运动,使胶片齿孔上要承受很大的力。因此,这种原理的电影摄影机的拍摄频率不可能提得很高。一般 35mm 的不超过每秒 200～300 幅,16mm 的不超过 600 幅。

应用胶片连续运动、光学补偿像移原理的高速电影摄影机,拍摄频率可从每秒几百幅到几万幅(10^2～10^4),最常用的还是每秒几千幅这个范围。

图 2-39 是棱镜补偿式高速电影摄影机的基本光路。图中 1 是摄影物镜、2 是旋转补偿棱镜、3 是输片齿轮、4 是连续运动的胶片。

图 2-40 是 一种 16mm 棱镜补偿式高速摄影机的光学系统图。它的输片齿轮和旋转棱镜安装在同一根轴上,另外还有一个可更换的扇形快门,用以改变每个幅面的曝光时间。这种摄影机的胶片容量是 120m。

除了采用棱镜补偿器外,在有些高速电影摄影机中还有采用旋转反射镜环的像移补偿器的。比较典型的结构如图 2-41 所示。这个图中光学系统没有画全。位于下部的棱镜 P 的前面

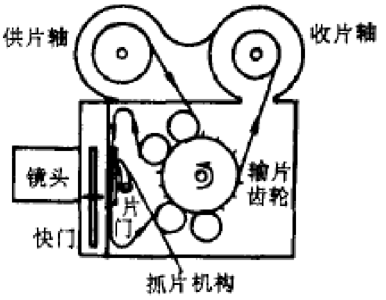


图 2-38　电影摄影机原理示意图

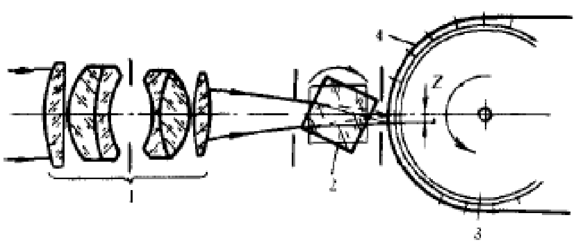


图 2-39　棱镜补偿式高速电影摄影机原理

还有一个摄影物镜，它垂直于纸面，位于图面的前方。这个未画出的摄影物镜将被拍摄的对象成像于位置 I(经棱镜 P 折转后)。然后这个像又经过反射镜环 D 上一个反射镜的折转后，由替续透镜 L 成一个二次像到连续运动的胶片上。像的补偿运动就是靠反射镜 D 按箭头方向不断转动实现的。

利用多排反射镜还可提高拍摄频率[图 2-41(b)中表示五排的情形]。

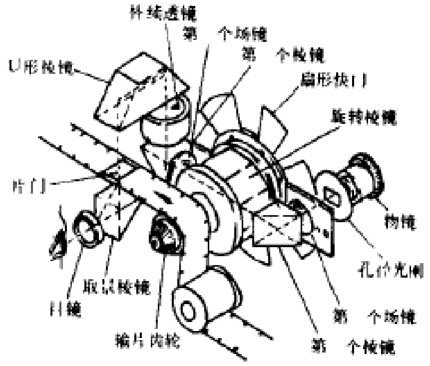
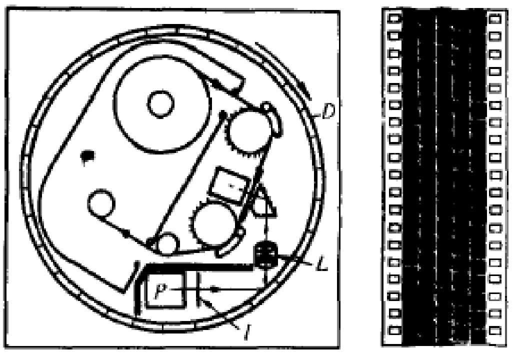


图 2-40　棱镜补偿式高速摄影机的光学系统



(a)　(b)

图 2-41　一种反射镜补偿式高速摄影机光路

这类摄影机的拍摄频率，大多数是靠改变供给电机的电压来控制的。为了避免加速过大而拉断胶片，一般要有一个启动过程。举例来说，容量为 30m 胶片的摄影机，从启动到每秒 3500 幅的最大速度，跑完整个 30m 胶片约需 1.5s。如果摄影机在启动一秒钟后达到每秒 3000 幅的速度时才开始拍摄，那么实际有用的记录时间只有 0.5s。因此，需要解决保证与被摄过程同步的问题以及精确知道拍摄频率的问题。

为了解决精确同步问题，在这类高速摄影机里一般都设计有专门的信号装置，可以在摄影机启动后，经过一定的时间或输过一定长度的胶片以后，送出一个同步信号，用以激发需要拍摄的高速现象。为了精确确定拍摄时的胶片速度，这类摄影机里一般都设计有专门的时间基准(时标)装置。最简单和最常用的方法是以一定频率(例如交流电源的 50Hz)点燃一个小的氖灯，它的像用一个辅助光学系统成在胶片边上。氖灯像之间的间隔就代表了一定的时间间隔。

图 2-42 是用这类摄影机所拍摄的中心快门的慢门机构，相片边上的白点就是时标氖灯的像。

(3)鼓轮式高速摄影。鼓轮式高速摄影也可算是电影摄影，但因所得胶片长度很短，较难用以放映。在这种摄影机里，胶片接成一个环形，贴附(固定)在旋转鼓轮的表面(图 2-43)，鼓轮带着这段胶片高速旋转，改善了胶片受力情况，从而使拍摄频率可以达到每秒 10^5 幅的数量级。

这类高速摄影机的一个问题是需要增加一个辅助快门，保证只在小于鼓轮转一周的时间内打开，以防止胶片被重复曝光。

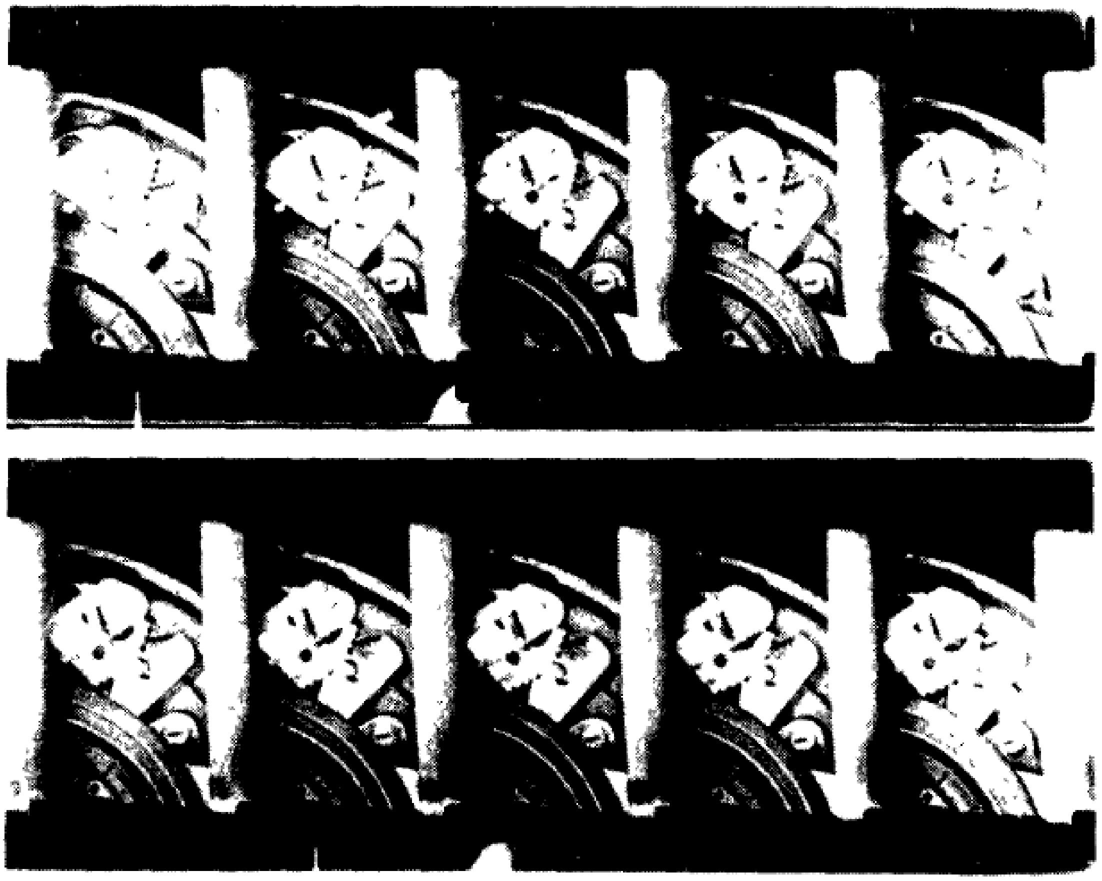


图 2-42 慢门机构的高速分幅照片

(4)转镜扫描型高速摄影。在这类高速摄影机里胶片不再运动，取代的是利用光学的方法(转镜)使物像沿着胶片转移而实现逐幅逐幅的曝光，拍摄频率可以达到每秒 $10^6 \sim 10^7$ 幅以上。

用转镜扫描的方法可作高速过程的分幅摄影，也可作不分幅的轨迹记录(图 2-37)。分幅摄影的转镜扫描光学原理如图 2-44 所示。图 2-45 是一种这类摄影机的结构示意图。由图可见，在这类摄影机里，只有当转镜处于一定的位置时才能将从物体来的光束反射到胶片上去，这就同样产生了一个反射镜的位置与被记录的高速过程之间的协调问题。为了解决这个问题，除了采用由反射镜的位置给出触发或启动高速过程的信号等方法(这类高速摄影机称“同步型”)以外，已经设计了多种所谓“等待型”的摄影机，其中两种光学原理如图 2-46 中所示。这类摄影机中也需要有防止胶片重复曝光的辅助快门。

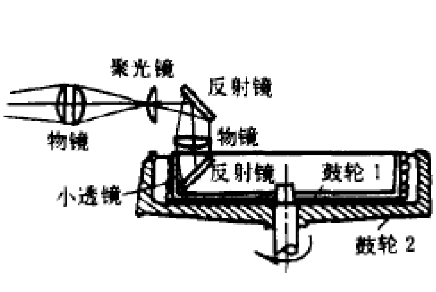


图 2-43 鼓轮式高速摄影机原理

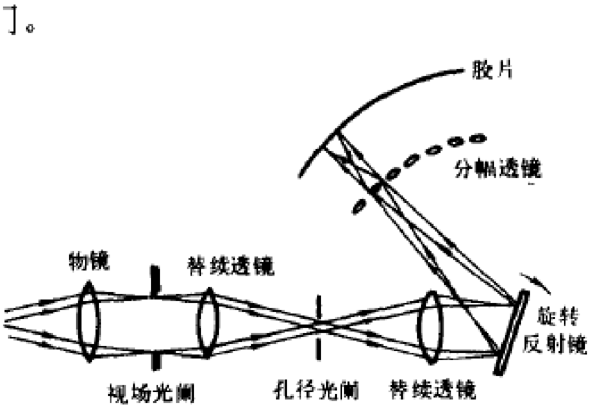


图 2-44 转镜扫描高速分幅摄影原理

图 2-47 是一种国产等待型转镜扫描高速摄影机的光学系统，它具有两个光学入口，当反射镜达到预定转速，仪器就一直处于工作状态，记录可以在较长时间范围内的任一瞬间开始。因此，这种仪器适用于拍摄动作起点不易控制或者目标与仪器距离很远的现象。它的主要性能

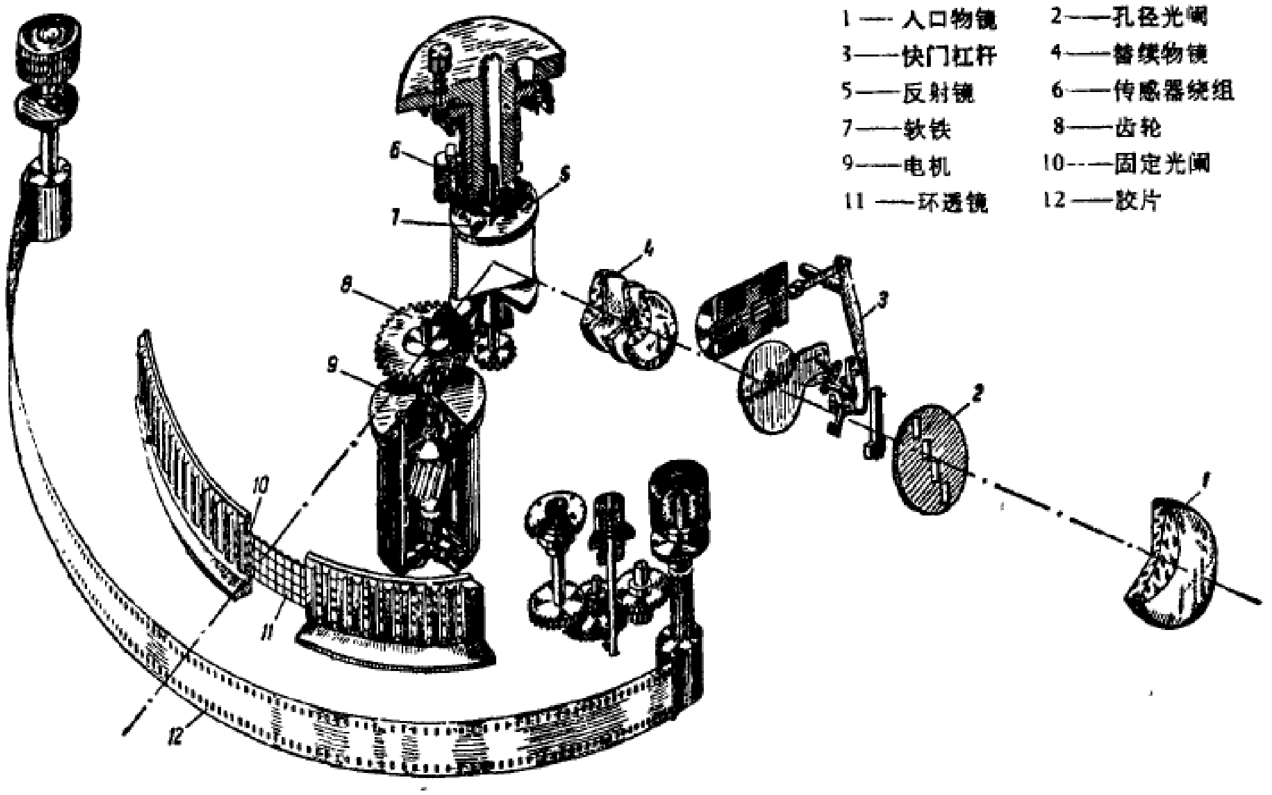


图 2-45　一种转镜扫描高速摄影机结构(分幅工作状态)

为：拍摄频率每秒 $1\times10^4\sim5\times10^5$ 幅，记录时间 224μs，(最大拍频时)，画幅尺寸 $10\times18mm^2$，画幅数 112(有效 110)，胶片规格 35mm，总焦距 760mm(用长焦距主物镜时)或 330mm(用短焦距主物镜时)，相对孔径 1/18，动态分辨率 20l/mm，拍摄距离 20m～∞(用长焦距主物镜时)或 2m～∞(用短焦距主物镜时)。

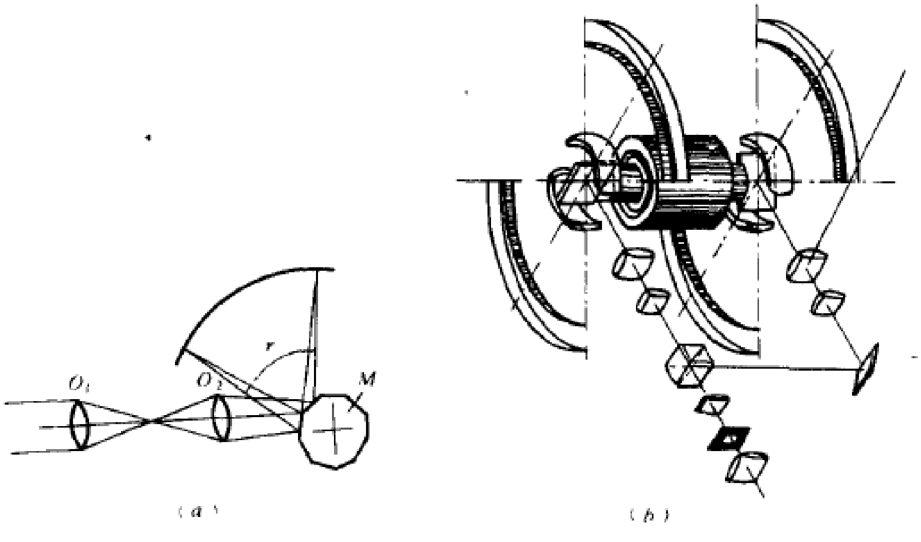


图 2-46　等待型扫描原理

为了进一步提高拍摄频率，有人考虑到光束经过一次反射以后，它的旋转角速度为反射镜旋转角速度的两倍这样一个特性，于是提出了利用多次反射的途径。图 2-48 是一种多次反射的光学加速原理。反射棱镜 3 仅起折转光线 90°的作用，并不使光线转速增加。实际起加速作用的是在同一轴上的旋转反射镜 6、10、14。固定反射镜环 5、7、9、11、13 和 8、12 的作用是将像顺序地从一个旋转反射镜转移到另一个旋转反射镜上去。因此，在这个原理图里，光束最后沿环透镜 15 的扫描角速度是反射镜旋转角速度的 7 倍。图中光路最前面的棱镜 4 叫道威棱镜，它的作用是补偿反射棱镜 3 旋转时所引起的像在画面内的旋转。

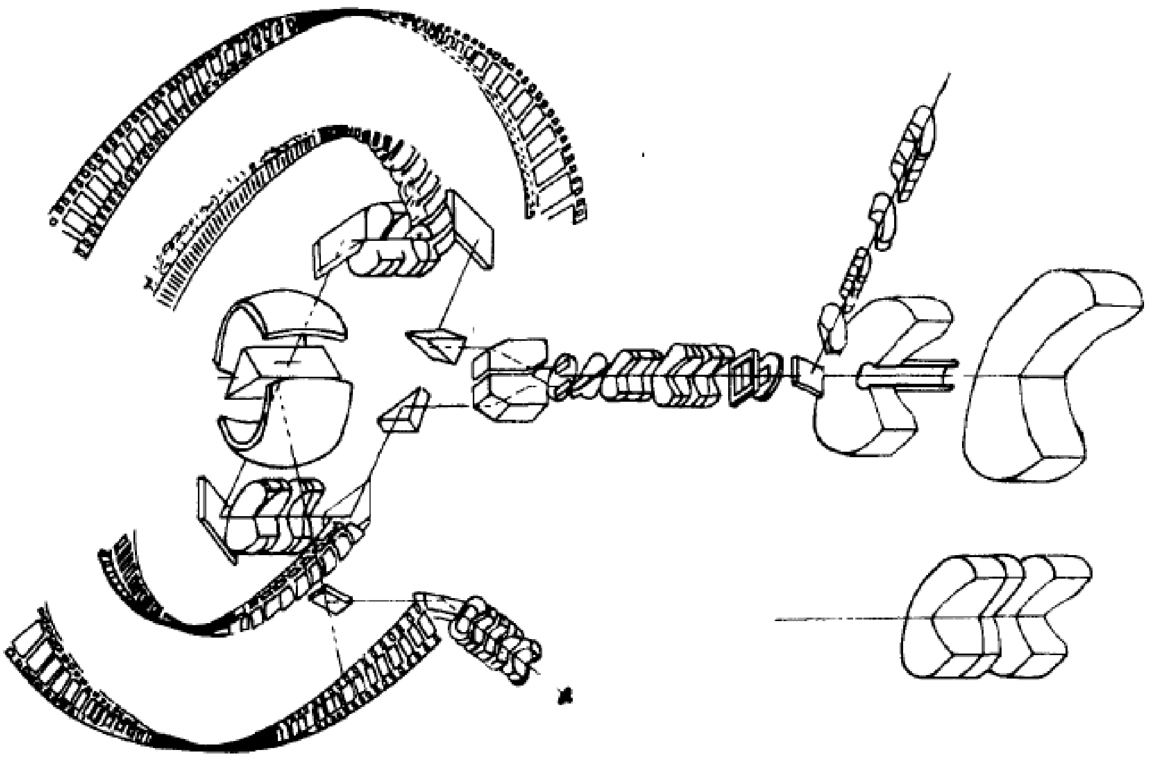
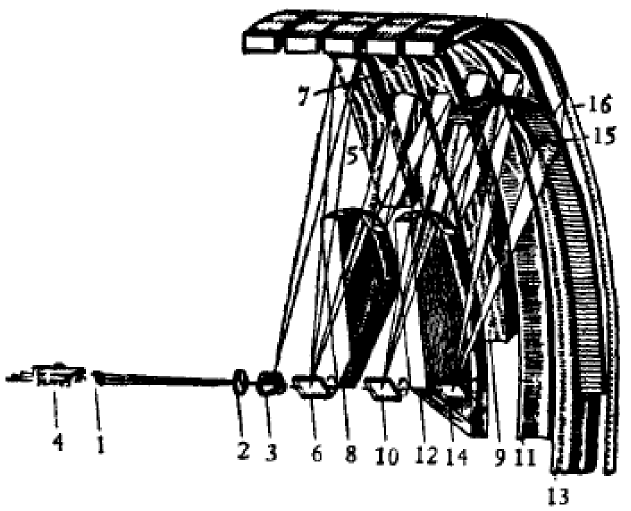


图 2-47　一种等待型转镜扫描型高速摄影机的光学系统

(5)网格高速摄影。网格高速摄影的工作原理与一般摄影稍有不同,它是将物像分解成大量不连续的单元,使胶片感光。举一个最简单的例子来说明:如设物像是由许多平行线条组成,并且线条的宽度与线条间的间隔相等。那么,当胶片对此物像曝光时,只有一些平行的窄条胶片部分被曝光(这里假设物像线条间的间隔是完全黑的)。如使物像和胶片岔过一个线条宽的距离,使胶片未曝光的部分与物像重合,这样不就又可对物像进行一次曝光了吗?这样得到的照片,是先后两个物像交岔叠合在一起的结果,需要用类似的方法才能分开。



1——物镜　2——场镜　3——反射棱镜　4——道威棱镜　5、7、8、9、11、12、13——固空反射镜环　6、10、14——旋转反射镜　15——环透镜　16——胶片

图 2-48　一种多次反射的光学加速原理

实际所用的网格高速摄影,物像是由极小的点组成,这样可使胶片能容纳更多的画面。组成网格的点早期有人采用两交岔的圆柱透镜来构成(图 2-49),目前的网格摄影机中都采用由球形小透镜所组成的网格(图 2-50),它不但能得到很高的像质,而且还可增大拍摄总幅面数目。由图 2-51,若使点像沿箭头 K 的方向移动(扫描),则扫描范围 S 可比网格相邻的点之间的距离大好几倍。

网格高速摄影的特点是:照片幅面大小与拍摄频率之间无制约关系因而可以做得较大;更换幅面只需使物像相对于胶片移过一个像元大小而不是一个幅面的距离,因而可以较低的扫描速度获得极高的拍摄频率,可达到每秒 10^8 幅甚至 10^9 幅。

(6)变像管高速摄影。在变像管里,成像电子束在荧光屏上的扫描是靠偏转板上所加的电压来实现的,因为没有高速运动的机械部分,因此可以达到极高的扫描速度。图 2-52 是 IMACON790 型变像管高速摄影机的结构示意图。

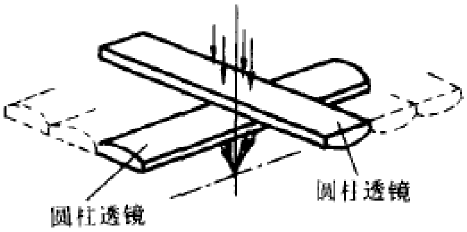


图 2-49　用交岔圆柱透镜组构成网格点

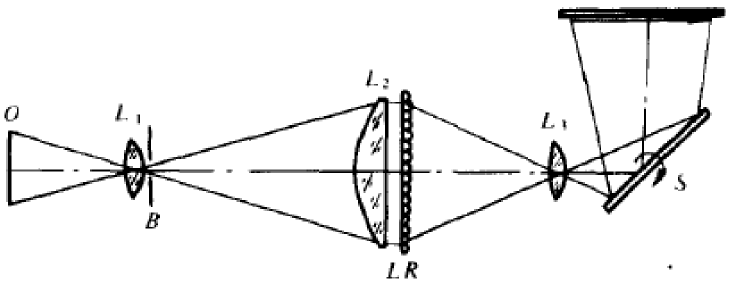


图 2-50　网格高速摄影机基本光路

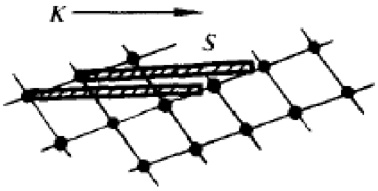


图 2-51　网格点扫描方向的选择

主要性能参数是：当作分幅摄影时，拍摄频率每秒 $1\times10^5\sim2\times10^7$ 幅，有用像画面积为 70mm（水平）×40mm（垂直），可拍 $16\times18mm^2$ 的画面 8 幅或 $8\times18mm^2$ 的画面 16 幅，静态空间分辨率 $13l_p$/mm，动态分辨率当每秒 10^5 幅时为 10lp/mm，每秒 2×10^7 幅时为 7lp/mm。当作轨迹记录时，可拍得 70mm 水平（时间）×18mm 垂直（空间）大小的记录，每毫

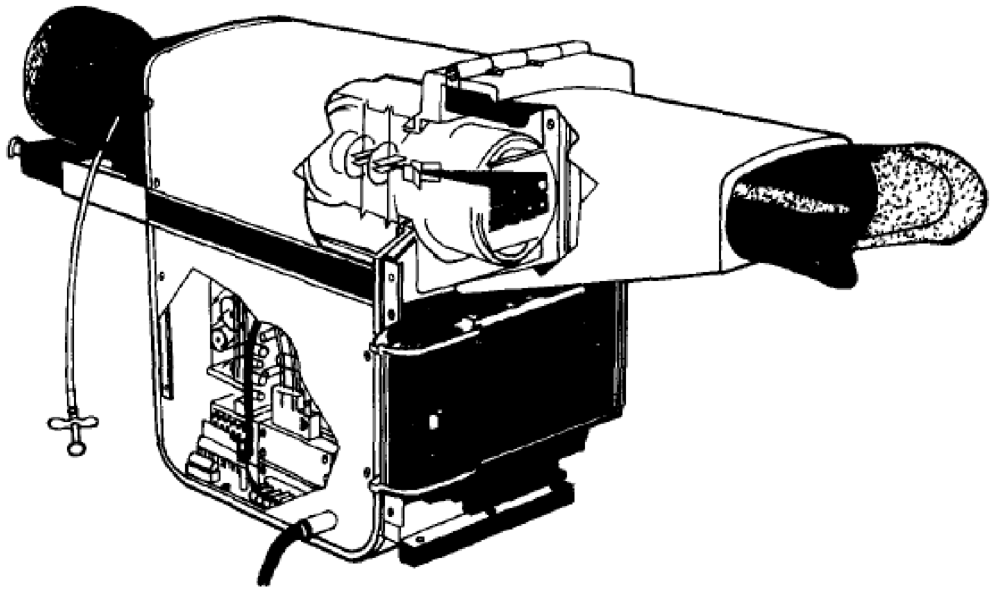


图 2-52　IMACON790 型变像管高速摄影机

米记录的时间为 10μs～1ns，最大时间分辨率为 150ps（当每毫米 1 纳秒时），动态空间分辨率当 10μs/mm 时为 12lp/mm，1ns/mm 时为8lp/mm。

第三章　摄影物镜

§3-1　摄影物镜的光学性能

摄影物镜(俗称摄影镜头、照相镜头或简单地就称作镜头)，是摄影机的主要光学部件，它的作用是将被摄景物投影到感光材料上，构成一清晰的光学影像。显然，摄影物镜的质量，将直接影响摄影结果的好坏。

参照我国有关国家标准[67]，摄影物镜的主要特性参数有：焦距、相对孔径、像面照度均匀度、照相分辨率、杂光系数、色贡献指数、畸变允许值、调制传递函数以及交换镜头的定位截距和变焦距镜头的像面位移。

一、焦距

摄影物镜的焦距，直接影响底片上所得影像的大小。

关于影像与景物之间的比例尺，我们在第二章中介绍航空摄影时曾经讨论过，并由(2-5)式表示为

$$M = 1/m = l_x/L_x = f/H$$

式中 H 为飞行高度，也即物距，它与焦距相比可视为物体位于无限远，故像距近似等于焦距。

对于一般有限距离的摄影，则可按照几何光学的垂轴放大率公式写成如下形式(参看图3-1)

$$\frac{1}{m} = \frac{y'}{y} = \frac{f' + x'}{x + f} = \frac{p'}{p} \tag{3-1}$$

这里按几何光学书中的习惯规定，将后焦距用 f' 表示。p 为物距，p' 为像距。

对于一般摄影来说，$p > 10p'$(例如用 50mm 焦距的镜头拍摄最近距离为半米左右)，故在一般摄影光学书中，习惯地把被摄物体到像(底片)平面的距离 L 当作物距，比例尺近似地写成

$$1/m \approx f'/L \tag{3-2}$$

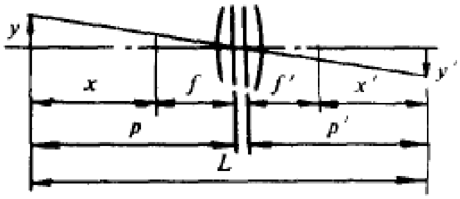


图 3-1　几何光学中的物像关系

显然，焦距 f' 愈长，影像比例尺也愈大。

根据焦距长短，一般将摄影物镜分为短焦、中焦(常焦)、长焦几种，短焦可短到十几毫米，长焦可达几米，它们的划分也按摄影机的使用情况而异。例如 150mm 焦距的镜头，在一般摄影中属中焦镜头，但在地面远程摄影和航空摄影中只能算是短焦镜头。所用物镜的焦距长短，主要根据摄影的用途来选择。

当相片的幅面一定时，镜头焦距愈长，能摄取的景物范围就愈小。

二、相对孔径

摄影物镜的相对孔径是入射光瞳直径 D 与镜头的焦距 f' 之比，光学书上常用 N 来表示

$$N = D/f' \tag{3-3}$$

如果物镜的入射光瞳不是圆形或者是中心遮挡的情况，可以用具有相同面积的等效圆的孔径来代替入射光瞳直径进行计算。这个等效圆孔也被叫做有效光阑，有效光阑的直径即有效孔径。

摄影物镜的相对孔径是决定像平面上像点照度的主要因素。由几何光学可有，轴上物点在像平面上所成像的照度 E_0 为（见图 3-2）

$$E_0 = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \pi L_0 \tau \sin^2(u') \tag{3-4}$$

式中 n, n' 分别为物方和像方介质的折射率，L_0 为物点亮度，τ 为物镜的透过率（或透射比），u' 为像方孔径角。

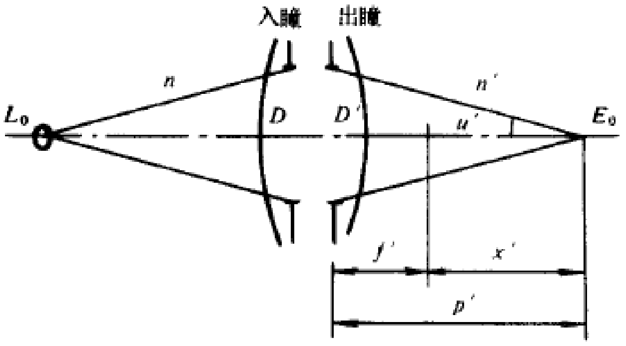


图 3-2　轴上像点的照度

一般 $n = n' \approx 1$（特殊情况例外，如水下摄影，$n \neq n'$），且 u' 角较小，则上式可近似写成

$$E_0 = \pi L_0 \tau \left(\frac{D'}{2p'}\right)^2 = \frac{\pi L_0 \tau}{4} \beta_p^2 \left(\frac{D}{p'}\right)^2 = \frac{\pi L_0 \tau}{4} \beta_p^2 \left(\frac{p - f}{p}\right)^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tag{3-5}$$

式中 $\beta_p = D'/D$ 为光瞳放大率。在大多数摄影物镜中，光瞳放大率 $\beta_p = 1$ 时，同时，仍假设 $p \gg f$，则上式可以写成

$$E_0 = \frac{\pi L_0 \tau}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tag{3-6}$$

由(3-6)式可见，$\tau(D/f')^2$ 决定了从被摄物体射入镜头的光能被利用的程度，它说明摄影物镜能够传递能量的特性，称为摄影物镜的光力。不考虑物镜透过率 τ 的光力，叫几何光力；考虑透过率 τ 的光力，叫物理光力。

习惯上把相对孔径的倒数，叫做光圈数或 F 数

$$F(\text{数}) = f'/D \tag{3-7}$$

因此，几何光力就等于 F 数的平方的倒数

$$\left(\frac{D}{f'}\right)^2 = \frac{1}{F^2} \tag{3-8}$$

相类似地，物理光力等于 T 数的平方的倒数

$$\tau \left(\frac{D}{f'}\right)^2 = \frac{1}{T^2} \tag{3-9}$$

其中

$$T(\text{数}) = \frac{F(\text{数})}{\sqrt{\tau}} \tag{3-10}$$

也叫 T 光圈数或 T 数（transmission number）。

摄影物镜性能所决定的是可能给出的最大相对孔径。在实际摄影中，随着被摄景物的亮度的不同，需要适当地改变孔径大小，以保证得到需要的像面照度，从而满足底片所要求的合适的曝光量。这一点由光阑机构来实现。我们将在第四章里详细讨论。

根据镜头光力大小的不同，一般将镜头分成：弱光镜头、普通镜头、强光镜头和超强光镜头几类，如表 3-1 所示。

表 3-1　摄影物镜按光力大小的分类

	普通小相机	航空摄影机
弱光镜头	相对孔径 1∶6.3 以下	相对孔径 1∶9 以下
普通镜头	1∶5.6～1∶3.5	1∶8～1∶6.3
强光镜头	1∶2.8～1∶1.4	1∶5.8～1∶3.5
超强光镜头	1∶1～1∶0.8	1∶2.8 以上

三、像面照度均匀度

按照应用光学中的定义，光学系统的视场角就是入射光瞳中心和入射窗边缘连线所构成的锥角。它决定了这个光学系统能够成像的范围。

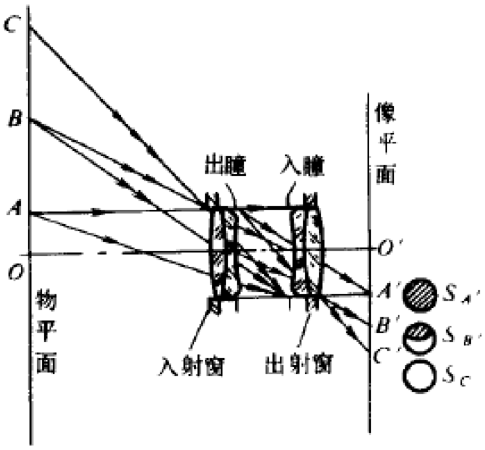


图 3-3　渐晕现象

单独就一个摄影物镜来说，限制这个成像范围的是物镜框本身，因此物镜框就起了入射窗的作用。由于入射窗不与被摄景物的物平面相重合，于是对所成的像就产生了所谓渐晕的现象。渐晕现象就是物平面各点所发出的射向入瞳的光束，随着物点偏离光轴距离的增大，被入射窗挡掉的光束部分增大的现象。在图 3-3 中，从轴上的 O 点到 A 点，所有物点射向入瞳的光束，都能全部进入物镜。但从 A 点以远光束就逐渐被阻挡。B 点射向入瞳的光束，只有一半左右能进入，而到了 C 点以外，光束就完全不能进入物镜。按照上述定义，这个物镜的视场角由 C 点来确定。但是，当物平面上各点亮度相同（即为一均匀亮度的物平面）时，像平面上与由 A 到 C 对应的范围内，照度将逐渐减弱。我们把会产生渐晕的 AC 区，称为渐晕区。渐晕的程度用一个叫做渐晕系数 K_v 的量来衡量，它是所求渐晕物点能进入物镜的有效光束截面积 S_β 与轴向光束截面积 S_0 之比

$$K_v(\beta) = \frac{S_\beta}{S_0} \tag{3-11}$$

事实上，我们在应用光学课程里已经学过，即使是在无渐晕的 OA 区内，像面上的照度也是从中心向边缘迅速下降的，这种照度的下降服从于 β 角余弦的四次方规律，即

$$E_\beta = E_0\cos^4\beta \tag{3-12}$$

(3-12)式中假设被摄物为均匀亮度，即 $L_\beta = L_0$

渐晕现象的存在，更增加了照度的不均匀程度，即像面内照度的分布应为

$$E_0 = K_v E_0\cos^4\beta \tag{3-13}$$

在目视光学系统中，接受光能的是人的眼睛。由于人眼能通过调节瞳孔来观察不同亮度的影像，所以像面照度不均匀的影响相对要小一些。而在摄影中，接受光能的是感光底片，若快门给像面各点的曝光时间都是相同的话，那么处于不同部位的具有相同亮度的物体，在感光底片

上将表现为不同的密度。在严重的情况下，甚至会出现视场中央已经曝光过度，而视场边缘还感曝光不足的现象。相同亮度而在相片上表现为不同密度的结果，还给那些利用密度测定、计算机自动分析摄影结果的先进的客观分析工作带来了困难。

因此，在摄影机里必须设法弃去有渐晕部分的视场。也就是说，如图 3-4 所示。底片画幅的大小应以和像平面中直径为 D 的无渐晕区内接为极限。这时，画幅框就是视场光阑，它通过摄影物镜在物平面上所成的像，就是入射窗，由它所决定的视场角，才是摄影机的视场角。它在摄影物镜像方的共轭角，即直径为 D 的无渐晕区和物镜出射光瞳中心连线所成的锥角，叫像场角。设底片画幅的对角线长 L，即 $L=\sqrt{l_x^2+l_y^2}$，显然应有 $L\leqslant D$，则像场角 ω' 应等于

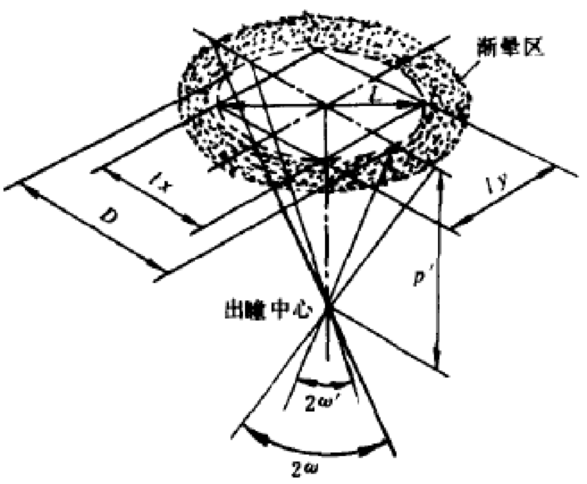


图 3-4　无渐晕的最大像场角

$$\omega' = \mathrm{arc\ tg}\,\frac{L}{2p'}$$

它随被摄景物的距离而异。最大可能的像场角大小显然应等于

$$\omega' = \mathrm{arc\ tg}\,\frac{L}{2f'} \tag{3-14}$$

摄影物镜根据视场角的大小，可分成窄角、常角、广角和超广角等几种。它们的划分如表 3-2 所示。

表 3-2　摄影物镜按视场角大小的分类

窄 角 镜 头	视场角 40°以下
常 角 镜 头	45～60°
广 角 镜 头	70～100°
超 广 角 镜 头	100°以上

在航空摄影中，为了拍得尽可能宽的地面复盖，广泛采用广角物镜乃至超广角物镜。照度从视场中心到边缘的严重下降，是利用广角物镜的主要障碍。为了改善视场内照度不均匀的状况，在一些航空摄影机中采用变密度的中性滤光镜或是将变密度的滤光层直接镀在摄影物镜的第一个表面上。滤光层的密度从中央向边缘减小。变密度滤光镜也可是带色的，这样既可改善像面照度的均匀性，又可改变光谱分布，减小湮雾① 的影响。采用这种措施是一种消极的办法，它将照度大的部分的光线挡去一些迁就照度小的部分，从而达到像面照度比较均匀，因此，计算曝光量时需要按减弱后的照度来考虑。

像面照度均匀度以下式表示

$$K'_Y = \frac{E_\beta}{E_0} \times 100\%$$

我国国家标准规定了在照相镜头最大光圈，物距刻度调整到 50 倍焦距，像高为 0.9y(y 等于 1/2 像幅对角线长度)时的 K'_Y 数值。对于像幅为 24×36mm² 的镜头，$f\leqslant$38mm 时 $K'_Y\geqslant$

① 通过大气层的光线被大气中的质点散射，由之引起的大气层的发光现象，叫做大气湮雾。湮雾散射有很强的光谱选择性。

20%，$f>38$mm 时 $K'_Y \geqslant 30\%$；对于像幅为 $60\times60\text{mm}^2$ 的镜头，$K'_Y \geqslant 30\%$。

为了改变像面照度均匀性，一些光学专家在设计摄影物镜时采用了“像差渐晕”的方法①，利用光阑像差来增加斜光束的通光截面积。例如苏联的 Руссар-33 航摄物镜，$K_v \approx 1/\cos\beta$。则由(3-13)式可得 $E_\beta \approx E_0\cos^3\beta$。在 Руссар-38 航摄物镜中，$K_v \approx 1/\cos^2\beta$，则 $E_\beta \approx E_0\cos^2\beta$。这就大大改善了照度分布的均匀性。

四、分辨率

在第一章里（§1-9）我们讨论了感光材料的分辨率，它的大小主要决定于乳剂层中的银粒大小以及一些影响光在乳剂内部散射的因素（乳剂厚度、表面平整性及片基反射等）。这里需要讨论摄影物镜的分辨率，因为照片最后的分辨率是它们两者合成的结果。

在应用光学课程里我们已经学过，表征一个光学系统分辨率的极限的是它的衍射圆斑（Airy 圆斑）的直径 d

$$d = \frac{1.22\lambda}{n'\sin u'} \tag{3-15}$$

同时根据实验又得出：两个靠得很近的衍射圆斑（像点），当两个亮斑中心间的距离约等于其半径时，人眼仍能清晰分辨开这两个圆斑来。因此，一个光学系统的衍射极限分辨率 R 等于

$$R = \frac{1}{d/2} = \frac{n'\sin u'}{0.61\lambda} \tag{3-16}$$

对于摄影物镜，可近似地认为是对无限远物体成像，即

$$\sin u' \approx D/2f'$$

又取 $n'=1$，$\lambda=555$nm，代入上式可得衍射极限分辨率为

$$R \approx 1480D/f'\,(\text{l/mm}) \tag{3-17}$$

实验表明，两个圆斑还可进一步靠近而仍能为人眼所辨认。因此，有的书上把衍射极限分辨率定为

$$R \approx 1800D/f'\,(\text{l/mm}) \tag{3-18}$$

实际上，摄影物镜由于存在着残余像差以及加工、装配等误差，实际分辨率要比理论计算的衍射极限分辨率低，而且往往视场边缘比视场中心还要低得多。

摄影物镜的分辨率值，可以用目视和照相的方法来测得。

目视法就是在长焦距准直管的焦平面上放置一块特制图案的分辨率板，在准直管的另一侧，人眼通过显微镜观察被测物镜所成的分辨率板的像，把刚刚能看清的那组分辨率条纹所对应的分辨率值，定为该摄影物镜的目视分辨率值。

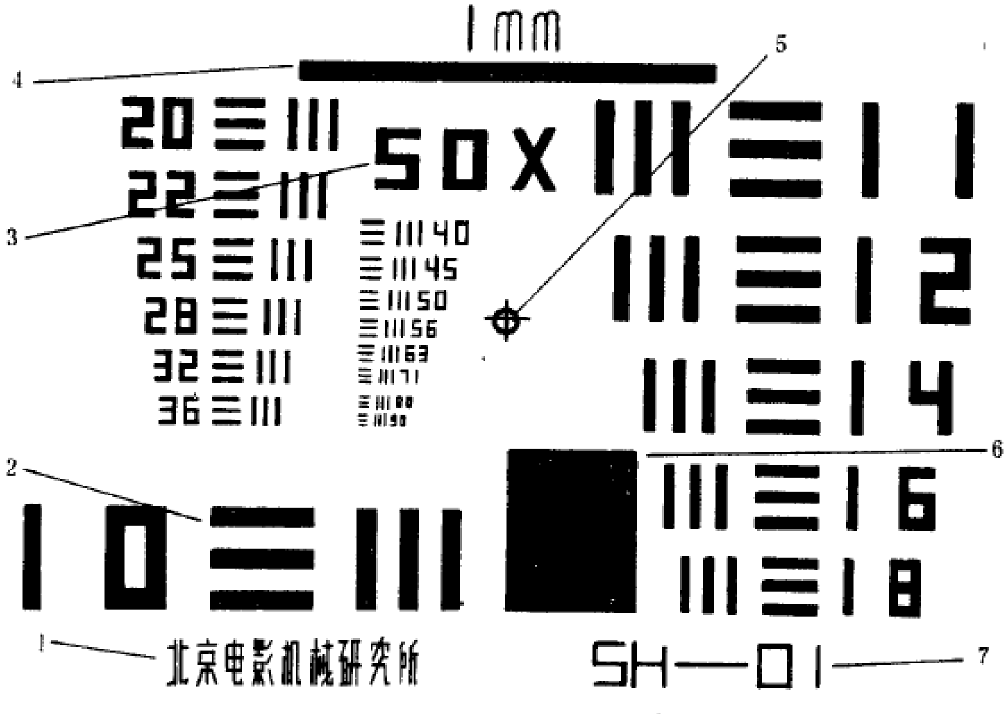
照相法是用装了被测物镜的摄影机在一定距离外对一大型分辨率板照相，或对准直管的分辨率板照相，并按规定的标准条件冲洗底片，然后用高倍显微镜进行判读。用照相法得到的实际是摄影物镜-感光材料的综合分辨率。若摄影物镜的分辨率为 R_0，底片的分辨率为 R_n，并假定在实验室条件下采用高对比的分辨率图案，则摄影物镜-感光材料的综合分辨率 R 可近似地表示为

$$\frac{1}{R} \approx \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_n} \tag{3-19}$$

---

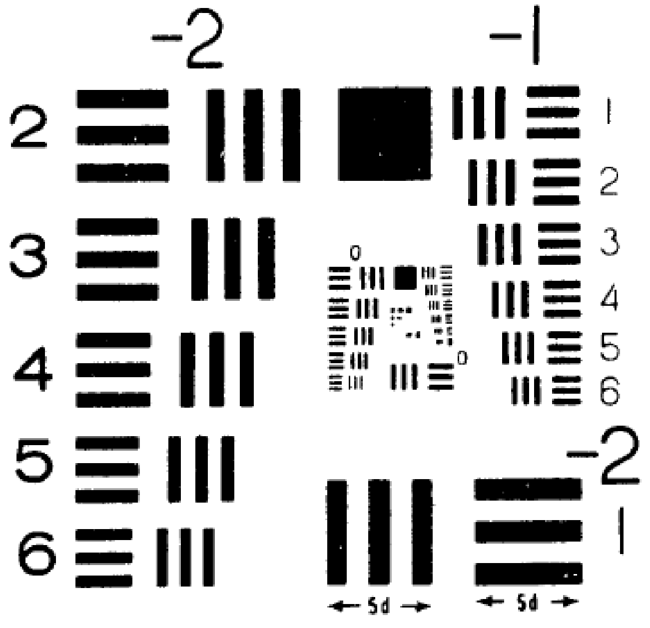
① 参看 M. M. 鲁西诺夫，技术光学，科学出版社，1961，65～68 或王之江，光学设计理论基础（第二版），科学出版社，1985，457～459。

各国标准中所采用的分辨率板的图案各不相同，图 3-5 中列举几种。图(a)是我国国家标准[68]规定的摄影镜头分辨率测试图，图(b)是美国军用标准 150A 的分辨率测试图案。



1—测试图生产单位；
2—分辨率线条组；
3—放大倍率；
4—放大率标尺；
5—测试图定位标记；
6—测试图光学密度控制区；
7—测试图型号标记

(a)



(b)

图 3-5　几种分辨率板的图案

由于摄影物镜的分辨率在其整个视场范围内是不一致的，一般视场边缘要比视场中央低很多，因此需要测量不同视场角的分辨率。例如，从中心开始，向几个方向每隔 5°视场角测一组读数，并且在每一个位置都需要测量子午和弧矢两个互相垂直方向线条的读数。摄影物镜分辨率的表示方法，可以是同时给出其中央多少对线每毫米，边缘多少对线每毫米(例如国家标准中对像幅 $24\times36mm^2$ 的定焦镜头和变焦镜头的分辨率分别规定为不小于表 3-3 和表 3-4 中的值)，也可以经计算后给出全部读数的简单算术平均值。更合理的是给出所谓面积加权平均分辨率(AWAR-Area Weighted Average Resolution)，它是将整个像面按一定的视场角间隔(例如 5°)划分成一些同心圆环带，然后以这些环带面积占整个像面面积的百分数作为计算分辨率平均值的权因子。计算 AWAR 的式子可以写成如下的形式

$$AWAR = \sum \frac{A_i}{A} \sqrt{R_i T_i} \tag{3-20}$$

式中 A 为整个像平面的面积，A_i 为第 i 个环带的面积，R_i、T_i 分别为第 i 个环带中心点的弧矢方向和子午方向的分辨率值读数。

分辨率的读数还与被摄对象的对比有很大关系。一般测量工作多采用高对比的分辨率板，但是这与实际摄影的情况并不相符，因此并不能完全说明所测摄影物镜的性能。为了能更全面地表明摄影物镜分辨细节的本领，往往还需给出对低对比象的分辨率。表 3-5 举例说明几种摄影物镜对高对比和低对比景物的分辨率。

表 3-3　像幅 24×36mm² 的定焦镜头的照相分辨率标准(lp/mm)

镜头类别	级别	中心	边缘
标准镜头 $38<f\leqslant61$	J0	40	25
	JⅠ	36	22
	JⅡ	32	16
	JⅢ	28	12
广角镜头 $f<38$	J0	40	20
	JⅠ	36	18
	JⅡ	32	14
	JⅢ	28	11
远摄镜头 $61<f\leqslant135$	J0	36	25
	JⅠ	32	22
	JⅡ	28	16
	JⅢ	25	12
远摄镜头 $f>135$	J0	32	25
	JⅠ	28	22
	JⅡ	25	16
	JⅢ	22	12

表 3-4　像幅 24×36mm² 的变焦镜头的照相分辨率标准(lp/mm)

镜头类别	级别	中心	边缘
标准段 $38<f\leqslant61$	J0	36	22
	JⅠ	32	20
	JⅡ	28	14
	JⅢ	25	10
广角段 $f<38$	J0	36	18
	JⅠ	32	16
	JⅡ	28	12
	JⅢ	25	9
远摄段 $f>61$	J0	32	22
	JⅠ	28	20
	JⅡ	25	14
	JⅢ	22	10

表 3-5　几种航空照相镜头的照相分辨率

镜头型式	制造厂家	分辨率(AWAR)l/mm		所用胶片
		高对比 1000∶1	低对比	
PleogonA	Carl Zeiss	51	27(1.6∶1)	Aviphot Pan30PE
(HR338E)	Perkin-Elmer	100	45(2∶1)	Pan-X
Panitek	Itek	250	160(1.6∶1)	3404
Kaligar	Itek	54	35(1.6∶1)	Pan-X
(HLT-548)	Hycon	150	75(2∶1)	3414
——	Geortz	44	30(2∶1)	Plus-X
——	Geortz	55	41(2∶1)	Pan-X
Xenotar	Schneider	150	90(2∶1)	3404

五、杂光系数

置于亮度均匀的面扩展光源上的黑体被镜头所成像的最小照度与移去该黑体后像平面上同一位置的照度之比称为杂光系数

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} \times 100\% \tag{3-21}$$

式中 ΔE 为杂散光形成的像的照度，E 为面扩展光源经被测镜头所成像的照度。国家标准规定的允许值，I 级定焦镜头为≤3%，II 级定焦镜头和变焦镜头为≤5%。

六、色贡献指数

色贡献指数(或简称 CCI 值——Color Contribution Index)，是一种由三个数组成的数组，它表征由镜头造成摄影彩色变化的程度。

前面(3-4)式表明，像面上的照度与镜头的透过率 τ 成正比，可以简化写成

$$E = K\tau \tag{3-22}$$

尽管镜头看来是无色透明的，实际不同牌号的玻璃对光的吸收是有波长选择性的，例如一些高折射率的重火石玻璃对短波有较强的吸收率，在透射光下看来略呈黄色。新式的镜头一般均加镀有增透膜(在反射光下呈蓝紫色)。因此，实际上，镜头的透过率 τ 是入射光的波长的函数，即 $\tau(\lambda)$，(3-22)式应该改写成是波长函数的形式

$$E(\lambda) = K\tau(\lambda) \tag{3-23}$$

不同的镜头，由不同牌号、不同数量和不同厚度的玻璃(或塑料)薄片组成。并加镀有不同的增透膜，它们的透过率 $\tau(\lambda)$ 并不相同。这样，当用同一种彩色感光材料拍摄时，不同镜头拍得同一景物的彩色影像的色彩将不尽相同。也就是说，彩色照片对彩色景物的彩色再现性，不但决定于胶片光谱感光度(感色性)以及光源光谱成分，而且也与镜头透过率 $\tau(\lambda)$ 的曲线形式有关。

尽管我们可以用仪器按规定波长间隔($\Delta\lambda$)测得摄影镜头的光谱透射比曲线 $\tau(\lambda)$，但是我们并不直接用它来描述镜头的色再现性能，因为它对彩色照片的彩色再现性的影响需要结合拍照时所用光源以及感光材料一起来体现。国际标准化组织(ISO)规定由所测的 $\tau(\lambda)$ 结合光源和感光材料特性经过计算得到的 CCI 值(色贡献指数)来描述摄影镜头的色再现质量，就是考虑了这一点。

对于一定光源照射下用一定镜头拍摄时，彩色感光材料蓝、绿、红三层感光层的响应值

R_B, R_G, R_R 可表示成

$$R_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)S_i(\lambda)\tau(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (i = B,G,R) \tag{3-24}$$

式中 $P(\lambda)$ 为光源能量的光谱分布，$S_B(\lambda)$，$S_G(\lambda)$，$S_R(\lambda)$ 相应为蓝、绿、红感光层的光谱感光度，$\tau(\lambda)$ 为镜头的轴向光谱透射比，$\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为彩色胶片感光的波长范围。

国际标准化组织(ISO)规定计算 CCI 值时采用 D_{55} 标准照明体①的光谱分布 $P(\lambda)$（见表 3-6），并用阿克发、富士、柯达、波拉洛依德四家厂家 1978 年生产的彩色胶片的光谱感光度的平均值作为计算 CCI 值的 $S_B(\lambda)$，$S_G(\lambda)$ 和 $S_R(\lambda)$（见表 3-7）。

先由它们算出三层平均感光层的加权光谱感光度 $W_B(\lambda)$，$W_G(\lambda)$ 和 $W_R(\lambda)$。具体求法如下：

表 3-6　D_{55} 标准照明体的相对光谱能量分布

波　长　λ, nm	ISO 标准镜头的光谱透射比 $\bar{\tau}(\lambda)$	D_{55} 的光谱分布 $P(\lambda)$
350	0.00	28
360	0.07	31
370	0.23	34
380	0.42	33
390	0.60	38
400	0.74	61
410	0.83	69
420	0.88	72
430	0.91	68
440	0.94	86
450	0.95	98
460	0.97	100
470	0.98	100
480	0.98	103
490	0.99	98
500	0.99	101
510	1.00	101
520	1.00	100
530	1.00	104
540	1.00	102
550	1.00	103
560	1.00	100
570	1.00	97
580	1.00	98
590	0.99	91
600	0.99	94
610	0.99	95
620	0.98	94
630	0.98	90
640	0.97	92
650	0.97	89
660	0.96	90
670	0.95	94
680	0.94	90
690	0.94	80

① 国际照明委员会(CIE --Commission Internationale de l' Eclairage)为了使光辐射测量标准化而推荐的光谱能量分布之一，它对应于 5503K 的相关色温，即相当于白昼的太阳光。

当无镜头时(可看作 $\tau(\lambda)=1$),(3-24)式可以写成

$$R_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) S_i(\lambda) \mathrm{d}\lambda \quad (i = B,G,R) \tag{3-25}$$

代入 $P(\lambda)$和 $S_i(\lambda)$求出 R_i。将所求得的 $R_i(i=B,G,R)$均规化成 100,可求得三个常数 K_i,即

表 3-7 日光型彩色胶片的平均光谱感光度(规化到各层峰值为 100)

波　长　λ,nm	蓝　$\overline{S}_B(\lambda)$	绿　$\overline{S}_G(\lambda)$	红 $\overline{S}_R(\lambda)$
350	2		
360	5		
370	12		
380	26		
390	49	1	
400	71	1	
410	87	1	
420	97	1	
430	100	1	
440	87	1	
450	80	1	
460	68	1	
470	47	2	
480	25	3	
490	11	6	
500	4	9	
510	3	14	
520	1	20	
530		31	1
540		60	1
550		100	2
560		51	3
570		54	5
580		39	7
590		11	12
600		2	19
610			26
620			34
630			54
640			83
650			100
660			70
670			17
680			2
690			

$$K_i = 100 \Big/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) S_i(\lambda) \mathrm{d}\lambda \quad (i = B,G,R) \tag{3-26}$$

于是,加权光谱感光度 $W_i(\lambda)$即等于

$$W_i(\lambda) = K_i P(\lambda) S_i(\lambda) \quad (i = B,G,R) \tag{3-27}$$

规化后的(3-25)式可以写成

$$R_i = 100 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_i(\lambda) \mathrm{d}\lambda \quad (i = B,G,R) \tag{3-28}$$

由规定的 D_{55}的 $P(\lambda)$和平均感光度值 $\overline{S}_i(\lambda)$求得的 $W_i(\lambda)$见表 3-8。

表 3-8 加权光谱感光度 $W_i(\lambda)$

波　长 λ nm	蓝　$W_B(\lambda)$	绿　$W_G(\lambda)$	红 $W_R(\lambda)$
350			
360			
370	1		
380	2		
390	6		
400	10		
410	14		
420	16		
430	17		
440	16		
450	14		
460	13		
470	9	1	
480	4	1	
490	2	1	
500	1	2	
510	1	3	
520		5	
530		8	
540		15	
550		24	1
560		12	1
570		13	1
580		10	2
590		3	3
600		1	5
610			7
620			8
630			14
640			21
650			25
660			17
670			4
680			1
690			

于是，下一步就可以根据摄影镜头的 $\tau(\lambda)$ 来求它的 CCI 值。

我们可以求出有镜头时的 $R_i(i=B,G,R)$

$$R_i=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}W_i(\lambda)\tau(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3-29}$$

得到三个 $R_i(i=B,G,R)$ 后，分别求对数，然后减去一个同样的数，使其中最小的一个等于零，各数再乘以 100，得到三个整数，这三个整数即为所求该镜头的 CCI 值。

例如，设由(3-29)式求得 $R_B=89$，$R_G=100$，$R_R=97$。取对数 $\lg R_B=1.95$，$\lg R_G=2.00$，$\lg R_R=1.99$。各减去其中的最小值 1.95，得：$\lg R_B=0$，$\lg R_G=0.05$，$\lg R_R=0.04$。再各乘 100，最后得 $100\lg R_B=0$，$100\lg R_G=5$，$100\lg R_R=4$。

CCI 值的表示方式为“ISO/CCI 0/5/4”。我国标准采用与 ISO 相一致的计算方法和表示方式，并且规定的标准值(由标准镜头求得，参看表 3-6 中标准镜头的 $\tau(\lambda)$)和公差如表 3-9 中所示。

表 3-9 色贡献指数标准值及公差

色	标准值	公差
蓝	0	+3 −4
绿	5	0 −2
红	4	+1 −2

七、畸变

畸变是镜头像差的一种，畸变大小可用绝对值或相对值来表示。绝对畸变是实际像高与理想像高之差，相对畸变则是绝对畸变与理想像高的比值。我国标准对一般摄影物镜规定的相对畸变允许值为：定焦镜头≤3%。变焦镜头≤5%。这样的要求对于测量制图相机的镜头来说是远远不够的。高质量的航空测量相机的镜头一般要求绝对畸变只有微米的量级大小。

八、调制传递函数

第一章里(1-9.3 节)我们已经针对感光材料讨论过调制传递函数。由于历史发展的原因，到目前为止仍有不少光学书籍在几个名词术语上概念混淆不清，这里有必要再作更细致一些的讨论。调制传递函数说得更完整一些就是调制度的传递函数，或者说，一个成像系统(一个物镜或一片感光胶片)传递景物调制度的本领。所以成像系统的调制传递函数等于像和物的调制度之比

$$\mathrm{MTF} = M_{像} / M_{物}$$

任何景物都可以看成是一个亮度(或光强、照度等)的空间分布函数。为了便于作图表示，我们假设一条线状景物，即讨论亮度随空间位置变化的一维函数 $L(x)$。按照傅里叶分析理论，任何周期函数均可展开成无穷多个不同频率(注意，这里是空间频率，即每毫米有多少个亮度起伏)、不同幅度的正弦函数之和(离散的频谱)，而任何非周期函数则可由傅里叶积分将它分析成连续频率的正弦波的积分(连续的频谱)。因此我们可以从讨论景物某一个给定频率的正弦波分量开始。

由图 3-6，我们得到这样二种定义这个景物分量的亮度分布特性的量[7,17]，一个是最亮细节和最暗细节之比，也就是我们通常说的明暗对比，叫对比度 C(Contrast)，显然

$$C = L_{max}/L_{min} \tag{3-30}$$

另一个是细节亮度对其平均值的起伏波动幅度，也就是相当于在电流中交流分量对直流分量的调制程度，这个量叫调制度 M(Modulation)，显然

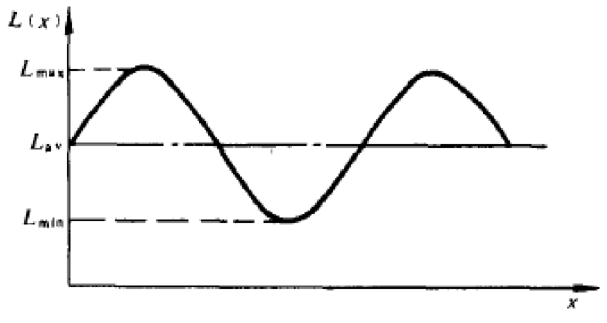


图 3-6 线状景物亮度的一个正弦波分量

$$M = \frac{(L_{max} - L_{min})/2}{(L_{max} + L_{min})/2} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \tag{3-31}$$

有的书上把(3-31)式定义的量叫做对比度①，那么与它相对应的成像系统传递这一量的能力的参数就应该叫对比传递函数(过去有的书上确曾这样叫过)。有的书上把(3-31)式定义

① 例如[24]。

的量又叫对比度又叫调制度[1]，从而企图从对比度引出调制传递函数。实际上(3-30)和(3-31)式这二种景物亮度分布的描述方式在不同的讨论场合都各有用处，完全可以也应该把它们区别定义。

通过上面的讨论，我们看到，景物的调制度是空间频率的函数 $M_{物}(\nu)$，经成像系统后的物像的调制度也是空间频率的函数 $M_{像}(\nu)$。成像系统的调制传递函数自然也是空间频率的函数

$$\mathrm{MTF}(\nu) = M_{像}(\nu)/M_{物}(\nu) \tag{3-32}$$

一般说来，它是一条小于1的[2] 随 ν 增加而下降的曲线。图3-7是无像差理想镜头(衍射极限)的MTF(ν)曲线，它的横坐标已取 $\nu_C=1/\lambda F=1$ 规一化，其中 ν_C 是该无像差镜头的截止空间频率，F 是光圈数，λ 是有效波长。

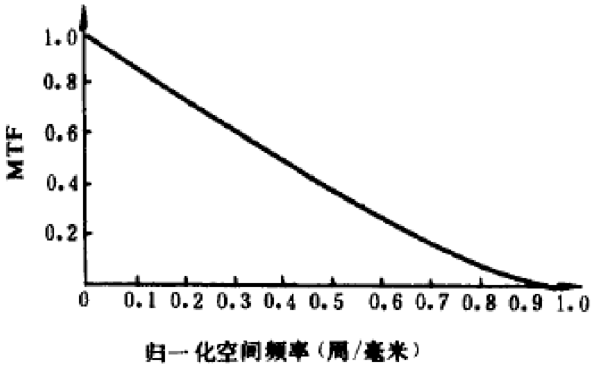


图3-7 无像差理想镜头的MTF曲线

由图3-7(及图1-39)可以看到，镜头和胶片都是景物空间频率的低通滤波器，影像总不如原景物清晰。

照相镜头MTF的测定方法可参看参考文献[51]第九章。

国家标准中对普通照相镜头的调制传递函数规定了如表3-10中的要求。

表3-10 像幅为24×36mm² 照相分辨率为I级的照相镜头的MTF值

特征频率	10 lp/mm		30 lp/mm	
视场	轴上	0.707y	轴上	0.707y
全孔径	0.6	0.3	0.3	0.15
$F8$	0.75	0.4	0.4	0.2

九、交换镜头的定位截距

物面位于无穷远时，交换镜头与相机机身连接的定位表面到镜头被选定的最佳成像面间的距离，称为定位截距。对于交换镜头来说叫镜头的定位截距，对于机身来说，则是机身的定位

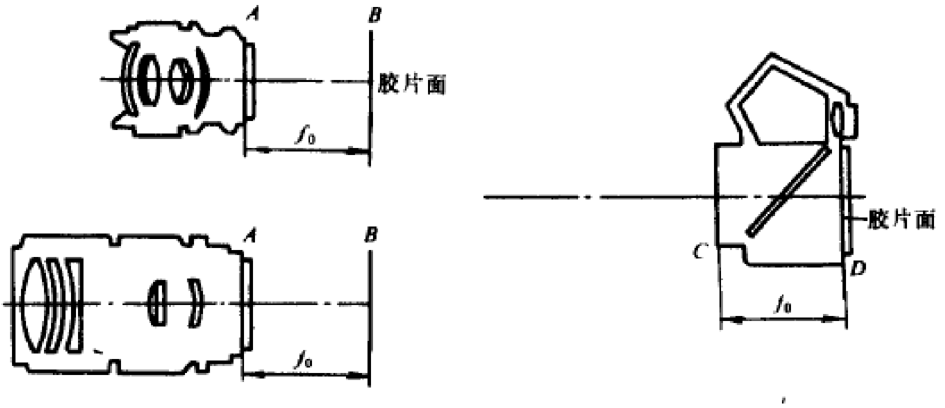


图3-8 镜头和机身的定位截距

截距(见图3-8)。各国各厂选用的定位截距各不相同，互相不能换用。我国标准规定的交换镜

---

[1] 例如[27,28,51]。

[2] 也有局部低频部分MTF>1的情形，我们这里不作讨论。

头的定位截距及公差如表 3-11 所示。

表 3-11　交换镜头的定位截距及公差

相　机　类　别	定位截距(mm)	公差(mm)
35mm 单反相机的可换镜头	45.5　　43.5	±0.02
120 单反相机的可换镜头	74.8	±0.03

十、变焦距镜头的像面位移

当变焦距镜头的调焦圈固定在无穷远位置时，在整个变焦过程中，最佳成像面轴向位置发生改变，其最大的改变量即为变焦距镜头的像面位移。

变焦距镜头的像面位移依据镜头焦深① 的%数值进行分级(我国标准按表 3-12 规定)。焦深的计算公式为：焦深$=\pm F_{min}d$，式中 d 为弥散圆直径，其数值由镜头所规定的照相分辨率等级中的中心分辨率(见表 3-3)的倒数确定，F_{min}为照相镜头的最小光圈数。

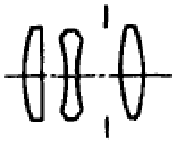
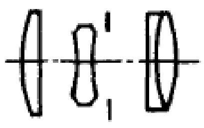
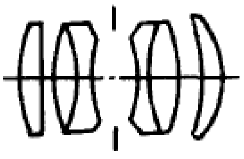
表 3-12　变焦距镜头像面位移的分级

级　别	Ⅰ	Ⅱ
像面位移	焦深×50%	焦深×100%

§3-2　摄影物镜的类型

表 3-13 中为地面和小型摄影机中常用物镜的基本类型。表 3-14 中则为常用的分幅航空摄影物镜的基本类型。更详细的结构参数可参看例如[6],[65]。

表 3-13　地面和小型相机中常用物镜的基本类型

类　型	结 构 型 式	视场 2ω	相对孔径 D/f	主 要 特 点	用 途 举 例
三片柯克型		40～60°	1:8～1:3	结构简单，像质较好	常用。如海鸥-4，海鸥-9，天鹅相机
天赛型		40～60°	1:8～1:	三片柯克型基础上发展而成。像质较三片型更好。	常用。如海鸥-205，东方，长城，西湖
双高斯对称型		50°	1:2	综合性能及像质皆好。为大孔径摄影物镜的基础。	海鸥 DF

① 焦深定义见§8-1。

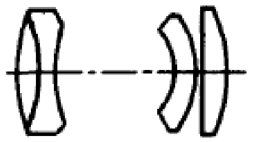
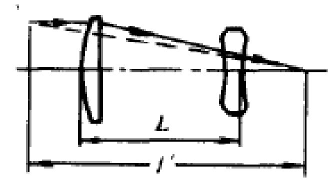
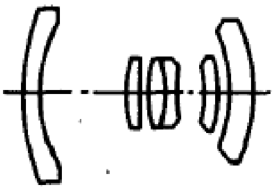
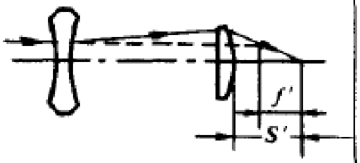
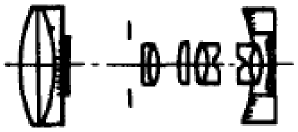
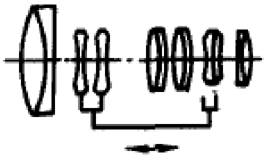
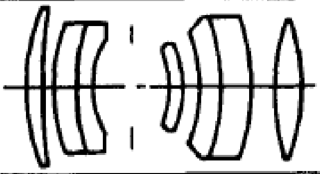
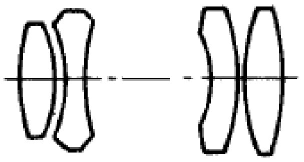
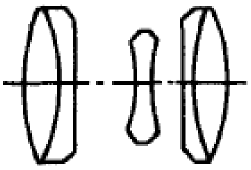
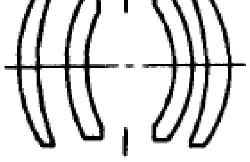
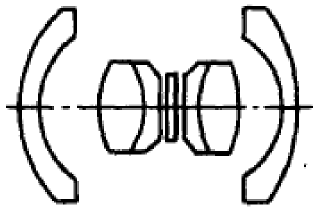
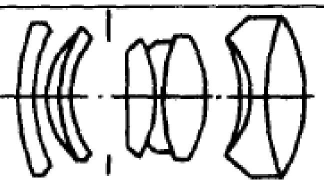
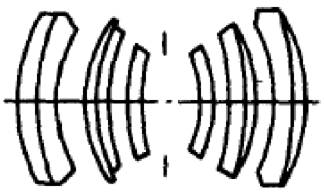
类　型	结构型式	视场 $2\omega'$	相对孔径 D/f'	主要特点	用途举例
摄远物镜			1∶3.3	基本原理为：镜筒长度短，一般 $L\leqslant\frac{3}{4}f'$	长焦距摄影物镜
反摄远物镜			1∶3.5	基本原理为：后截距 $l'>f'$，为短焦距物镜提供安放平面镜、快门等的空间	电影摄影物镜，单镜头反光相机物镜等
折反射物镜		4.6°	1∶8.3	光路经反射镜折叠，使镜筒长度更短 $L\approx\frac{1}{3}f'$	长焦距远程摄影物镜
变焦物镜		$f=200\sim600$mm	1∶9.5	几组透镜前后移动实现连续变倍	电影、电视等摄影物镜

表 3-14　分幅航空摄影物镜的基本类型

序号	结构型式	视场角 $2\omega'$	相对孔径 D/f'	焦距 f'(mm)	幅面 (mm^2)	分辨率(l/mm)		特点及用途
						中心	边缘	
1		60°	1∶2.5	100	70×80	45	8	低空侦察相机
2		32° 24°	1∶6.3 1∶7	400 1000	300×300	35	24	中、高空侦察相机
3		30°	1∶8	600	230×230	60		高空侦察相机
4		96°	1∶6.3	100	180×180			畸变较大用于侦察相机

续表

序号	结构型式	视场角	相对孔径	焦距	幅面	分辨率(l/mm)		特点及用途
		$2\omega'$	D/f'	f'(mm)	(mm²)	中心	边缘	
5		122° 104°	1:6.8	70 100	180×180	25~30 30~35	10~12 12~14	用像差渐晕改善像面照度，用于航测相机
6		60°	1:4	210 170	180×180	50 47	30 28	航测相机
7		62°	1:4	210	180×180			航测相机

§3-3 镜头与机身的连接

摄影机的物镜一般都装配成一个独立的部件，然后与机身用不同的方法相连接。对于只配用一种固定焦距镜头的相机来说，机身和镜头为固定连接，通常采用螺钉连接在一起，平时就不再拆卸。对于配用一套可更换的不同焦距的交换镜头的相机来说，机身和镜头往往采用快速装卸的连接方式。但不论哪一种，都要在机身和镜头上设计并加工出精确的定位面，保证镜头装在机身上后，其光轴和主面相对于底片的感光面有正确的相互位置。

单镜头反光照相机一般都可配购不同焦距的交换镜头。为了迅速方便地更换镜头，这类相机要求镜头座的结构应该装卸方便、迅速，每次安装都能保证镜头相对于焦平面有准确的位置，装上镜头后要能迅速可靠地锁紧，在使用中不易松动。

目前，单反照相机镜头座的结构有三种类型：螺纹型、卡口型和复合型。

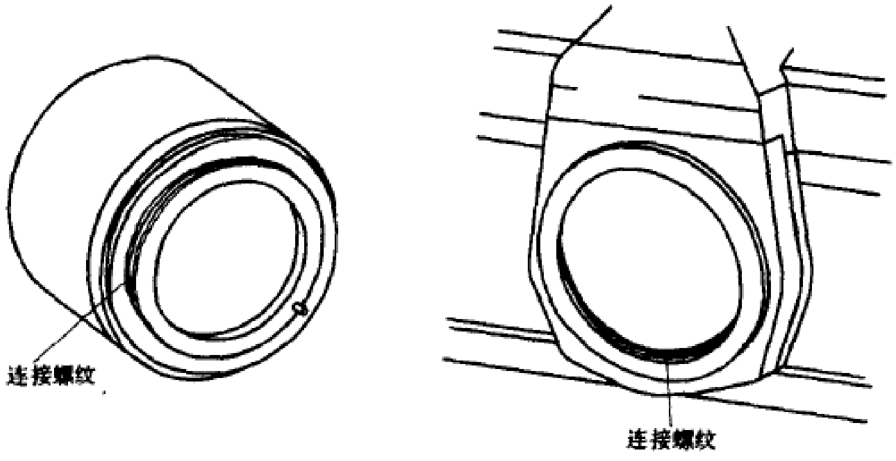


图 3-9　螺纹型镜头座

螺纹型镜头座如图 3-9 所示。在镜头底座的凸台上和机身镜头座孔内分别制出相配的阳螺纹和阴螺纹，安装时，把镜头拧入镜头座，直至镜头和镜头座上的定位面彼此贴紧为止。螺纹型镜头座连接牢固可靠，零件结构简单，易于加工，但装卸不够迅速(需拧动多圈)，且不易保证

镜头旋紧的最后位置，不利于对准光圈和反光镜连动机构或快门连动机构。

卡口型镜头座如图 3-10 所示。在镜头底座的凸台上制出三段均匀分布的角宽度略小于60°的等厚外凸缘，在机身镜头座孔内壁也制出三段形状相同的内凸缘。镜头上外凸缘与镜头

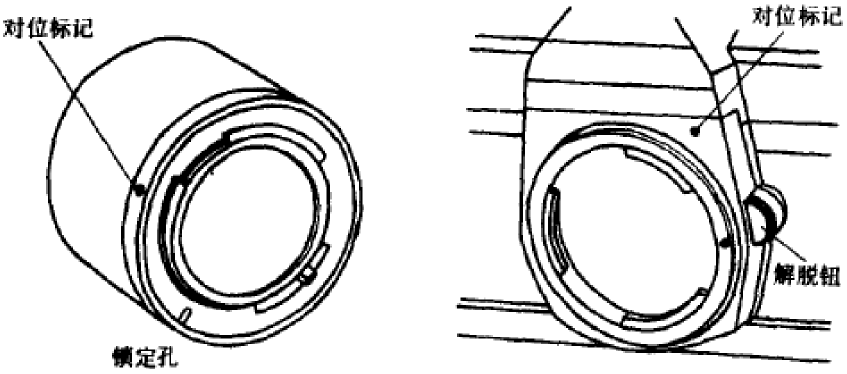


图 3-10 卡口型镜头座

底座定位面之间形成的凹槽宽度和机身上内凸缘的厚度相等(按动配合设计)。安装时，将镜头的三个外凸缘对准并插入镜头座内凸缘间的三个凹口中，顺时针方向把镜头旋转 60°，直至固定在镜头上的撞钉或撞块被固定在镜头座内的限位钉或限位块限位为止，镜头上的外凸缘就卡入了镜头座孔的内凸缘下面，镜头与机身就被互相咬合的凸缘连结在一起了。为了使镜头的凸缘在安装和拆卸时都能够迅速对准镜头座上的凹口，通常在镜头底座侧壁和镜头座上都有对位标记，一般是红色的小圆点。安装时，只要把镜头上的红点和镜头座上的红点对齐，就能迅速地把镜头插入镜头座。拆卸时，只要反方向旋转镜头，重新使两个小红点对齐，就能迅速把镜头拔出镜头座。显然，卡口型镜头座装卸镜头要比螺纹型镜头座更加方便迅速。为了防止摄影时误动将镜头拧脱，卡口型镜头座都附加有锁定机构，通常是在镜头座内安装带弹簧的锁钩或锁销，在镜头筒上做出缺口或孔，当把镜头旋转到位时，锁钩自动弹入缺口，锁住镜头，使镜头不能改变连接好的位置。拆卸镜头时，必须拨动镜头座上的解脱钮，使锁钩解脱镜头，才能反方向拧动并卸下镜头。

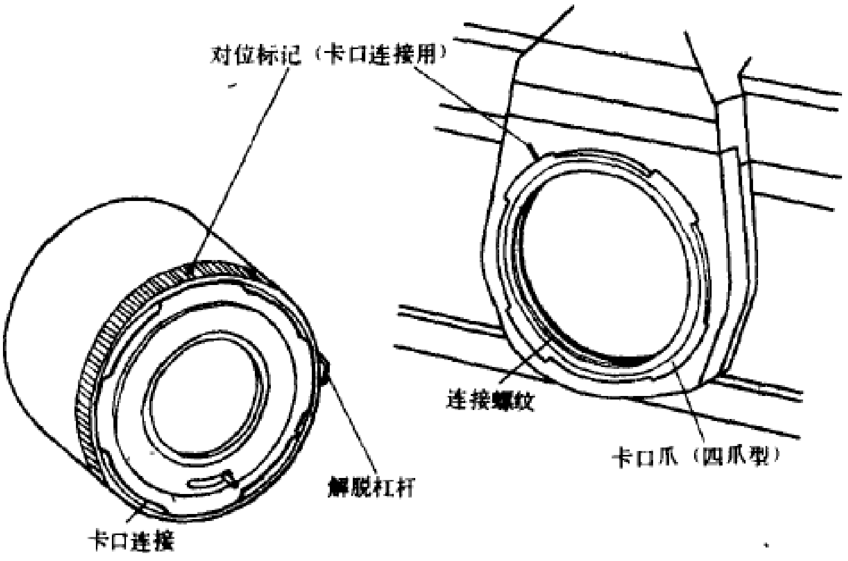


图 3-11 另一种卡口型镜头座

图 3-11 为另一种卡口型镜头座。安装时，镜头不需要旋转。在镜筒上有一个可旋转但不能旋出的滚花套环，内凸缘就做在这个滚花套环上，而外凸缘则做在机身的镜头座上。安装时，同样把滚花套环上的对位标记与机身上的对位标记对准，滚花套环的凹口就能落入镜头座的凸缘内，然后旋转滚花套环，直至限位块限位，锁销弹入锁孔，镜头与镜头座便牢固地连接在一起

了。对于尺寸和重量较大的镜头，采取这样的连接方式避免了转动镜头显然是合适的。

复合型镜头座如图 3-12 中所示。这种镜头座兼有前述螺纹和卡口两种结构。设计这种复合型镜头座的目的，主要是为了使同一个机身既能配用具有螺纹座的镜头，又能配用具有卡口座的镜头，进一步扩大可换镜头的范围。

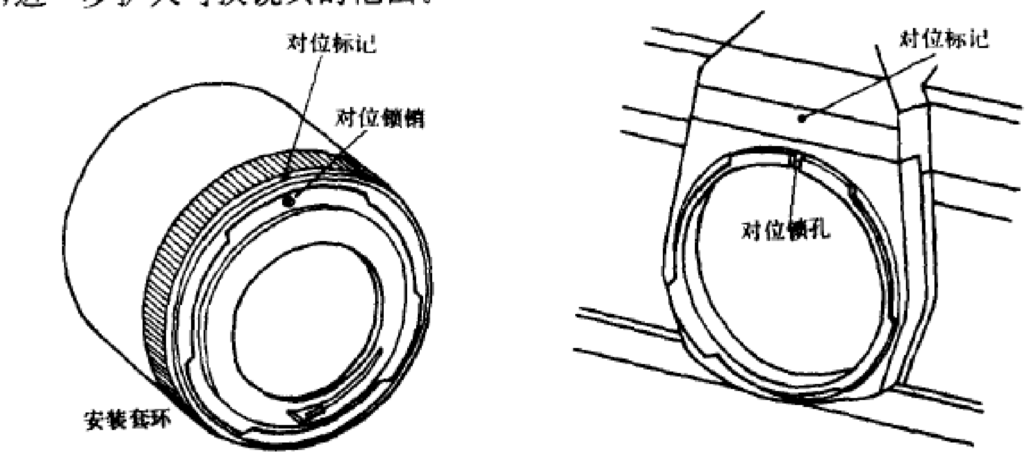


图 3-12　复合型镜头座

与老式莱卡 M3 照相机同时代的单镜头反光照相机，大多采用莱卡式螺纹接口，但目前几乎全部被卡口型取代了。各厂家均采用自行设计的卡口尺寸，因此除一部分可以互相交换外，

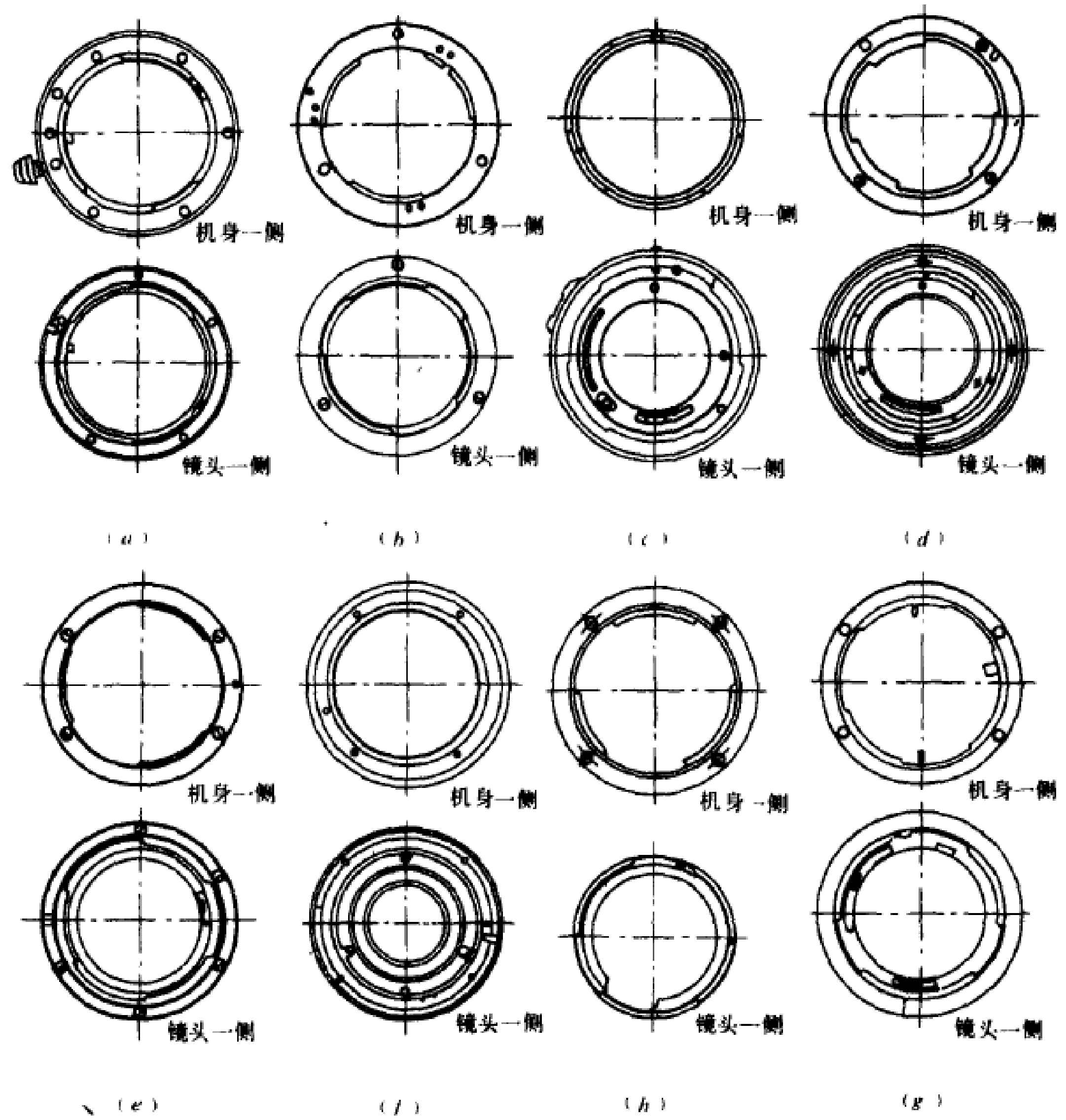


图 3-13　几家日本公司采用的接口方式

多数不能互换通用。图 3-13 为日本几家公司所采用的接口方式。

第四章　可变光阑

§4-1　概　　述

在大多数摄影仪器的物镜里，用来限制成像光束口径的孔径光阑能够改变通光孔径的大小，故称为可变光阑，通常也叫做光圈。光阑机构则是构成可变的光阑孔并调节光阑孔径的机构。

一、可变光阑的作用

1. 控制和调节像面曝光量　如第三章所述，摄影物镜的相对孔径 D/f' 或光圈数 F 是决定像面照度的主要因素之一。根据曝光量的定义，放在摄影物镜像平面上的感光材料所接受的曝光量是像面照度与曝光时间的乘积。在摄影机里，曝光时间是由快门来控制的，可变光阑则以它的通光孔来限制和改变成像光束的口径，从而调节像面照度，控制像面曝光量。关于像面上各点的曝光量和平均曝光量与摄影系统中各曝光参数之间的定量关系将在第六章中详细讨论，这里仅用轴上点的照度公式来说明可变光阑对像面照度和曝光量的控制和调节作用。

根据曝光量的定义 $H=Et$ 和像面中心点的照度公式(3-6)可得出像面中心点的曝光量为

$$H_0 = E_0 t = \frac{\pi\tau}{4} L_0 \left(\frac{D}{f'}\right)^2 t \tag{4-1}$$

式中入射瞳孔直径 D 与可变光阑实际孔径 d 之间的关系为

$$D = \beta d \tag{4-2}$$

式中 β 为可变光阑通过它前面的光组成像时的横向放大率。

摄影仪器中大多数可变光阑的通光孔不是圆形，而是由光阑片的直线工作边或圆弧工作边围成的多边形。在这种情况下，实际孔的等效孔径是一个面积与多边形孔面积相等的等效圆的直径，因此，等效孔径 $d_{效}$ 与光阑的实际孔面积 S_d 之间的关系为

$$d_{效} = 2\sqrt{\frac{S_d}{\pi}} \approx 1.13\sqrt{S_d} \tag{4-3}$$

相应地入瞳的有效孔径 $D_{效}$ 与它的孔面积 S 之间有如下关系

$$D_{效} = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} \approx 1.13\sqrt{S} \tag{4-4}$$

于是(4-1)式可改写为

$$H_0 = k_1 L_0 d_{效}^2 t = k_2 L_0 S_d t \tag{4-5}$$

式中 k_1、k_2 是与物镜焦距和透过率，以及入瞳与光阑的横向放大率有关的常数。该式说明像面中心曝光量与轴上物点的亮度、可变光阑的等效孔径或通光面积，以及曝光时间的关系。显然，当被摄物的亮度改变时，如果不改变快门的曝光时间，就要调节可变光阑的通光孔径或面积，使具有一定感光度的感光材料得到它所需要的一定曝光量，以获得一定的摄影效果。在使用闪光灯摄影时，曝光时间取决于闪光脉冲的持续时间，而被摄物的照度与闪光灯的发光强度及摄影距离有关，所以在摄影时，要根据所选用的闪光灯的光强和摄影距离，适当调节可变光阑的

孔径。由此可见,光阑机构在控制和调节像面上感光材料所接受的曝光量方面起着重要的作用。

2. 选取和调节景深 摄影时能在底片平面上清晰成像的物空间深度,也就是景深,与光阑孔径有关,光阑孔径愈小,或光圈数 F 愈大,景深愈大;反之,景深愈小(景深与光阑孔径或 F 数的定量关系见 § 8-1)。因此,在需要选取和改变摄影的景深范围时,就要利用光阑机构来调节可变光阑的孔径。为此,在许多摄影镜头上设有景深标尺,它实际上是给摄影者提供一个光圈数与景深的对照表。

此外,可变光阑在摄影物镜中的位置,决定了成像光束的位置,它不仅对像差的大小有影响,而且对像面照度的分布也有影响,因此,可变光阑的位置是在光学系统设计时通过像差和渐晕的计算确定下来的。一般是把它放在各个视场角的斜光束与轴向光束集中汇交的地方,对于对称型物镜来说,这个位置一般在前后光组的对称中心附近。如果偏离光束集中汇交的位置,将使渐晕增加,像场照度分布的均匀性下降。

二、光圈数及其标准系列

目前,可变光阑的工作特性主要还是用摄影物镜相对孔径的倒数,也就是(3-7)式所定义的 F 数来表示。如 § 3-1 中所述,F 数没有考虑物镜的透过率,所以它仅描述了可变光阑的一种几何特性。T 制光圈,即由(3-9)式定义的 T 数则考虑了物镜的透过率,比 F 数更能说明可变光阑在限制和改变通过物镜的光通量方面的物理特性。然而,无论是 F 数还是 T 数,都没有考虑摄影距离对像面照度的影响,因为在从(3-5)式导出(3-6)式时,作了 $p \gg f$ 的假设。对于大多数普通摄影、地面远程摄影或航空摄影来说,摄影距离对像面照度的影响是可以忽略的。但是,对于近距离摄影(一般指 $p < 10f$)时,忽略(3-5)式中的 $(p-f)^2/p^2$ 项产生的误差将超过 20%,而且当摄影距离变化时,像面照度将有显著的变化。为了考虑摄影距离对像面照度的影响,定义

$$F_M = \frac{1}{2n'\sin(u'_M)} \tag{4-6}$$

式中 F_M 称为近距离摄影时的有效 F 数,也叫做孔径比;n' 为摄影物镜像空间的折射率;u'_M 是与给定摄影距离的轴上物点共轭的轴上像点对出瞳直径张角的一半,也就是像方孔径角的一半,当出瞳孔不是圆形时,u'_M 可以看作是对出瞳孔的等效圆直径的半张角,脚标 M 是指共轭成像的垂轴放大率,它等于像距与物距之比。

把(4-6)式代入(3-4)式,并考虑到大多数摄影物镜的物方和像方介质都是空气,即 $n=n'=1$,可得

$$E_0 = \frac{\pi L_0 \tau}{4} \frac{1}{{F_M}^2} \tag{4-7}$$

又由(3-6)式和(3-7)式可得

$$E_0 = \frac{\pi L_0 \tau}{4} \frac{1}{F^2} \tag{4-8}$$

比较这两个式子可见 F_M 和 F 在控制和调节像面照度或像面曝光量方面起同样的作用,但是两者的意义和内容不完全相同。

由(4-7)式和(3-5)式并假设光瞳放大率 $\beta_p=1$,则可得 F_M 和 F 的关系式

$$F_M = \left(\frac{p}{p-f}\right) F \tag{4-9}$$

显然，F 只与入瞳的有效孔径和物镜焦距有关，而 F_M 则还与摄影距离 p 有关。当 $p \gg f$ 时，$F_M \approx F$，因此 F 数实际上是 F_M 在摄影距离无限远时的极限。

目前在摄影仪器中通用并作为摄影物镜光圈刻度标记的光圈数仍是 F 制光圈数，即 F 数。F 数的标准系列各国大体是一致的。我国国家标准 GB9917-88《照相镜头》[67]中规定，光圈数系列是下列表达式确定的数列

$$F = 2^{m/2n} \tag{4-10}$$

式中 m 为任意的整数，n 为 1、2、3 分别表示第Ⅰ系列、第Ⅱ系列、第Ⅲ系列。各个系列的光圈数数值列于表 4-1 中。GB9190-88[69]还规定了刻制在照相镜头上的光圈标记的标准系列为表中第Ⅰ系列的部分数值，并为刻制数字的工艺和读取数字的方便考虑，仅取至小数第一位，即 0.7、1、1.4、2、2.8、4、5.6、8、11、16、22、32、45、64、90、128。摄影物镜最大相对孔径的标记数值不一定恰好与上述光圈系列相吻合。因此，光圈数标记的第一个数字允许不是标准系列中的数字，但从第二个数字开始，以后的所有数字都必须采用标准系列数字。如果对应于物镜最大相对孔径的第一个光圈数与第二个从标准系列中选取的光圈数很接近，则往往略去这个标准数值，以免引起困惑。例如，物镜的最大相对孔径为 1.9，则刻制在镜头上的光圈数标记应略去与 1.9 很接近的标准系列数 2，而记作 1.9、2.8、4、5.6、8……。

表 4-1　光圈数系列

第Ⅰ系列		第Ⅱ系列		第Ⅲ系列	
m	$n=1$	m	$n=2$	m	$n=3$
−2	0.5000	−4	0.5000	−6	0.5000
		−3	0.5946	−5	0.5612
				−4	0.6300
−1	0.7071	−2	0.7071	−3	0.7071
		−1	0.8409	−2	0.7937
				−1	0.8909
0	1.000	0	1.000	0	1.000
		1	1.189	1	1.122
				2	1.260
1	1.414	2	1.414	3	1.414
		3	1.682	4	1.587
				5	1.782
2	2.000	4	2.000	6	2.000
		5	2.378	7	2.245
				8	2.520
3	2.828	6	2.828	9	2.828
		7	3.364	10	3.175
				11	3.564
4	4.000	8	4.000	12	4.000
		9	4.757	13	4.490
				14	5.040
5	5.657	10	5.657	15	5.657
		11	6.727	16	6.350
				17	7.127
6	8.000	12	8.000	18	8.000
		13	9.514	19	8.980
				20	10.08
7	11.31	14	11.31	21	11.31
		15	13.45	22	12.70
				23	14.25
8	16.00	16	16.00	24	16.00
		17	19.03	25	17.96
				26	20.16
9	22.63	18	22.63	27	22.63
		19	16.91	28	25.40
				29	28.51
10	32.00	20	32.00	30	32.00

续表

第Ⅰ系列		第Ⅱ系列		第Ⅲ系列	
m	$n=1$	m	$n=2$	m	$n=3$
		21	38.05	31	35.92
				32	40.32
	—		—		—
	—		—		—
	—		—		—

三、对光阑机构的基本要求

(1)光阑的通光孔应尽可能地置于光学系统设计时所确定的位置上，通光孔形应尽量对称，如有对称中心，其对称中心应与物镜光轴重合；

(2)光阑通光孔的大小应能在要求的范围内逐档调节或连续调节，分档数目应满足使用要求；

(3)当把光阑调节在某一档时，光阑通光孔的实际通光面积对应的实际光圈数应与该档光圈的标称值相符，其误差不超过有关标准[67]所规定的允差值。

(4)光阑机构在调节光阑孔径时应转动灵活，手感轻便，在整个工作范围内不应有过松过紧或卡死的现象；调定到某一档光圈时，应能迅速可靠地定位，且不论分划环(盘)还是光阑孔都不应在外界震动影响下发生变动。

(5)结构尽量简单，零件加工和装配工艺性要好，使用要方便。

(6)安装在镜筒内部的零件表面必须进行良好的消光处理；经常摩擦的零件(如光阑片和动环、定环)表面还应进行耐磨和润滑处理，但不能污染物镜表面；外露的零件(如光圈调节手轮、分划环等)表面应进行装饰性处理和注意造型美观。

§4-2　可变光阑的类型和结构

可变光阑的结构类型不多，如果按它含有的光阑片数目分，可以分为单片光阑、双片光阑和多片光阑，多片光阑一般也叫做虹彩光阑。单片光阑不能连续改变光阑孔径，而双片光阑和虹彩光阑用两片以上的光阑片来构成通光孔，可以用改变光阑片位置的方法来连续改变通光孔的大小。

一、单片光阑

单片光阑是光阑机构中最简单的一类，按照它们的结构又可以分为插片式、转盘式、摆片式和卷轴式等四种。插片式如图 4-1 所示，插入镜头筒狭缝内的光阑片上只有一个大小固定的圆孔，要改变孔径，只有更换光阑片。因此在每个光阑片上都做出凸耳，便于用手插入镜筒或从镜筒内拔出。这种插片式光阑可以说是光阑机构中最原始的形式。它已经很少用于摄影机，只是在某些不需要经常更换光阑孔径而又要求孔径精度很高的制版镜头或实验室仪器内使用。转盘式光阑如图 4-2 所示，在一个圆盘形光阑片上沿圆周分布着若干大小不同的圆孔，绕轴 O_1 旋转光阑片就可以把不同孔径的圆孔移到物镜光路内。显然，转盘式光阑更换孔径比插片式要方便得多，迅速得多，然而它所占空间比较大，而且圆盘上的孔数越多，圆盘尺寸也越大，所以这种转盘式光阑也只是用在实验室内。摆片式光阑如图 4-3 所示，在扇形光阑片上只开着

两三个大小不同的圆孔，可以把它看成是圆形光阑片的一部分。显然，可供选择的孔径数目比上述转盘式光阑少多了，但外形尺寸也小得多。因此，摆片式光阑在价格低廉、结构简单的低档照相机里得到应用。卷轴式光阑如图 4-4 所示，它的光阑片是一条可以卷绕在 A、B 两个轴筒上的薄钢带，不同孔径的圆孔沿钢带的长边方向直线等距排列。沿箭头方向旋转 A 轴筒，可以把钢带从 B 轴筒上退下而卷绕在 A 轴筒上；沿箭头的反方向旋转 A 轴筒，可以借助扭簧的恢复力矩把钢带从 A 轴筒退下卷绕到 B 轴筒上。如此两个方向移动钢带，就可以把不同孔径的圆孔移到物镜光路中。

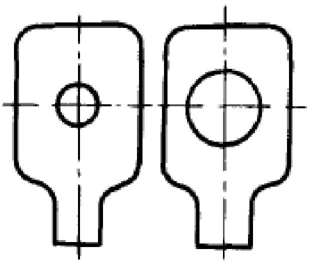


图 4-1　插片式光阑

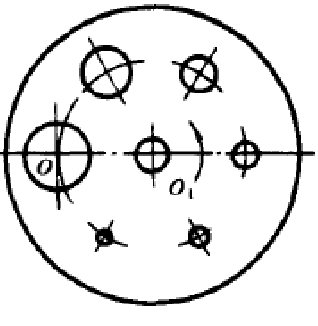


图 4-2　转盘式光阑

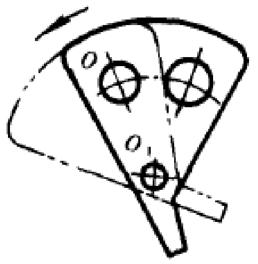


图 4-3　摆片式光阑

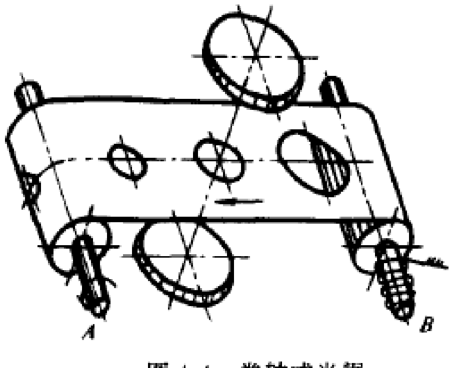


图 4-4　卷轴式光阑

单片固定孔光阑的结构简单，孔径精度高，孔形象质好，这是它的主要优点。它的最大缺点是不能连续改变孔径，只能逐个更换，因此调节不方便，或导致外形尺寸比通光孔本身大得多。

二、双片光阑

双片光阑构成可变光孔的光阑片只有两片，因此孔形不够理想，但孔径连续可变。它由于片数少，厚度薄，在放置光阑的镜间距很小的广角摄影物镜中有明显的优点。同时也由于结构简单、成本低，而广泛用于廉价的低档或普及型照相机中。双片光阑的两个光阑片还可以兼作快门叶片，成为一种可变光阑和快门合一的曝光量控制机构，广泛用于自动控制曝光量的小型照相机中。

双片光阑按照两光阑片运动方式的不同可分为直移式、剪式和对摆式等三种。

直移式双片光阑如图 4-5 所示。光阑片 1 和 2 可以在直线导轨 5 和 7 内移动。固定在光阑片 1 上的销钉 8 和固定在光阑片 2 上的销钉 3 分别插入光阑调节盘 6 上的曲线槽 9 和 4 内。当光阑调节盘随光圈手轮（图上未表示）顺时针方向旋转时，其曲线槽推动销钉，使两光阑片相背移动，增大光孔；当光阑调节盘随光圈手轮逆时针方向旋转时，两光阑片就相向移动，使光孔缩小。恰当地设计曲线槽的曲线可以使光圈刻度等间隔分布。这种光阑所需的横向尺寸较大，只适用于小孔径的镜头。

剪式光阑机构如图 4-6 所示。光阑片 1 和 2 可绕各自的轴 7 和 5 转动，固定在拨杆 4 上的拨销 6 插入两个光阑片的长孔内，扭簧 3 使拨销与固定在光阑调节圈 9 上的凸轮板 8 保持接触。因为凸轮板各段宽度不同，所以当光阑调节圈旋转到不同位置时，拨销 6 将发生位移，两个光阑片在拨销的推动下同时反向摆动，其运动方式就象剪刀一样。由两光阑片的工作边围成的光孔大小也就发生变化。凸轮板的工作轮廓可以设计成阶梯形（如图所示），也可以设计成光滑连续的曲线。当设计成阶梯形时，光阑的通光面积分档调节；当设计成光滑连续的曲线时，光阑的通光面积既可以分档调节（由定位器控制各档的位置），也可以连续改变。图 4-7 也是一种剪式光阑机构，两光阑片和可绕同一个轴转动，拉簧使分别固定在两个光阑片上的小滚轮始终保持和凸轮的工作面接触。凸轮的两半周有相同的曲线轮廓，来自电机的动力经传动链和齿轮带

动凸轮转动，从而推动光阑片作剪式运动——张开或收拢，使其工作边围成的光孔扩大或缩小。

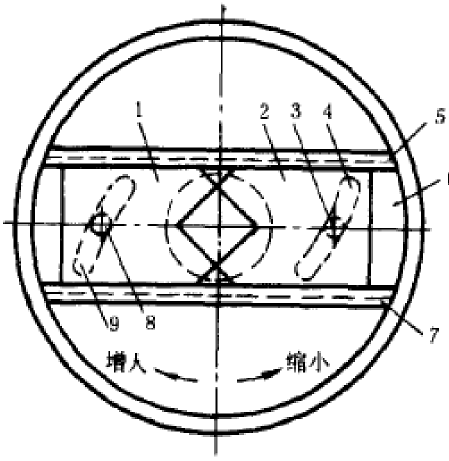


图 4-5　直移式双片光阑

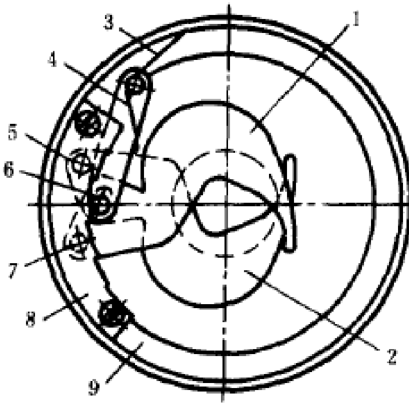


图 4-6　手动调节的剪式双片光阑

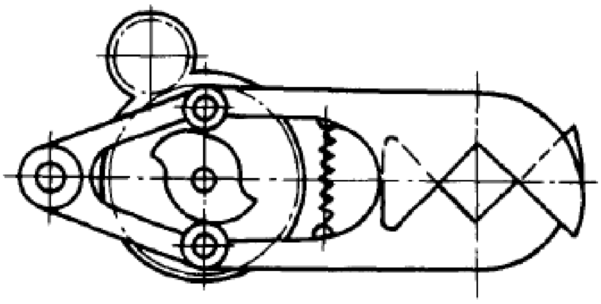


图 4-7　电动调节的剪式双片光阑

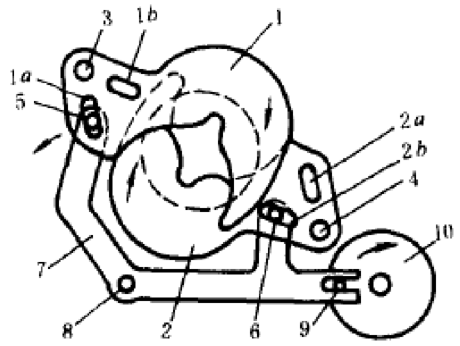


图 4-8　对摆式双片光阑

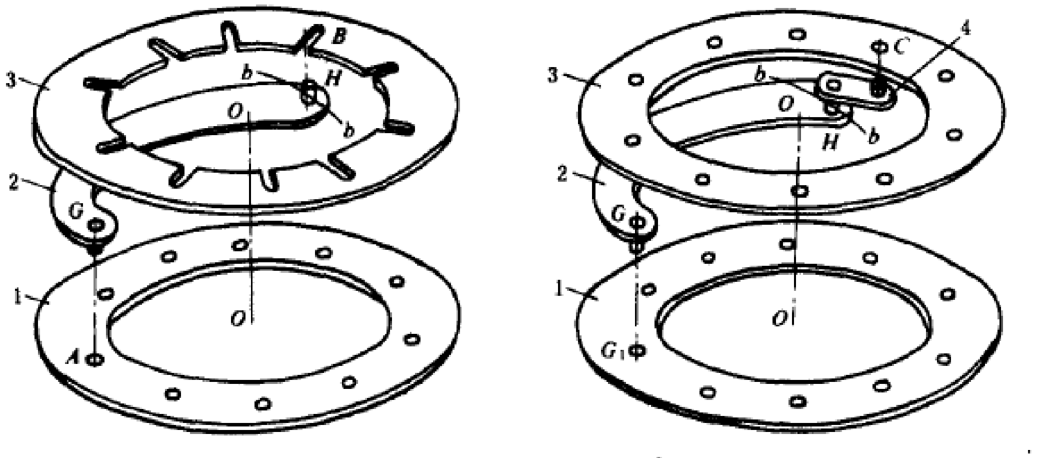
对摆式双片光阑如图 4-8 所示。光阑片 1 和 2 可分别绕各自的转轴 3 和 4 转动，固定在拨杆 7 上的两个销钉 5 和 6 分别插入两光阑片的长孔 $1a$ 和 $2b$ 中，固定在圆盘 10 上的拨销 9 插入拨杆右端的 U 形槽内。当圆盘顺时针方向旋转时，带动拨杆逆时针方向绕轴 8 摆动，从而推动两光阑片同时绕各自的转轴都向顺时针方向旋转，使光孔缩小；反之，若圆盘 10 逆时针方向旋转，拨杆就顺时针方向摆动，两光阑片同时向逆时针方向旋转，使光孔扩大。因为这种光阑的两个光阑片相对配置，且工作时摆动方向相同，所以把这种光阑叫做对摆式双片光阑。

三、虹彩光阑

虹彩光阑是用多片可转动的光阑片来构成孔径可以连续改变的通光孔的。虹彩光阑的这种功能很像人眼睛里能够随光线强弱缩小或放大瞳孔的虹膜。虹膜俗称虹彩，所以这种可变光阑取名为虹彩光阑。

虹彩光阑按光阑片的结构和形状，可分为光阑片等宽的和光阑片不等宽的两类。按照光圈调节环上光圈数刻度的分布可分为等间隔的和不等间隔的两类。

1. 光阑片等宽的虹彩光阑　图 4-9 所示为这种虹彩光阑的基本结构，它由固定环（或简称定环）1、光阑片 2 和活动环（或简称动环）3 组成。固定环一般固定在物镜壳体上，活动环可以绕物镜的光轴 OO 转动。光阑片两端铆有销钉，分别与定环和动环连接。为便于区别，我们把插入定环上沿圆周均匀分布的孔 A 并可在孔内转动的销钉 G 称为定销，与动环连接并可在动环的推动下沿以定销中心为圆心的圆弧 $\overset{\frown}{bb}$ 运动的销钉 H 称为动销。动销与动环的连结或传动



(a)导槽型　　(b)连杆型

图 4-9　虹彩光阑的基本结构

方式有导槽型结构和连杆型结构两种。导槽型结构如图 4-9(a)所示，动环上分布着与定环上孔数及光阑片数目相等的导槽 B，当动环绕光轴旋转时，导槽 B 推动动销 H，使光阑片绕定销 G 转动。所有的光阑片（图中只表示了其中的一片）在动环的推动下一起转动的结果，使它们所围成的通光孔或者扩大或者缩小。图 4-10 所示为这种虹彩光阑的典型结构。由右图可见 12 片光阑片互相重叠构成通光孔并遮挡孔外区域的光线，以及动销 H 与动环 3 的导槽配合的情形。左图表示在物镜筒内的安装结构。转动镜筒外面的光圈调节环 6 装定所需要的光圈数时，通过拨销 5 使动环 3 转动，把光阑孔调到所需的大小。

由于动环的转动中心与光阑片的转动中心不同，动销的运动轨迹不与动环导槽的运动轨迹重合。当动环推动光阑片改变通光孔大小时，动销相对于导槽有移动。图 4-9(b)所示的连杆型结构是解决这个问题的另一种方式。在连杆型虹彩光阑中，动环 3 上沿圆周均布的销孔 C 代替了导槽型结构中的导槽。在孔 C 和光阑片的动销 H 之间用连杆 4 连接并传递运动。

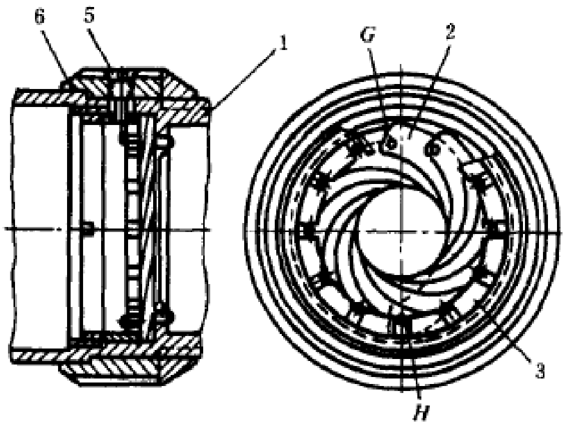


图 4-10　光阑片等宽的导槽型虹彩光阑

无论导槽型还是连杆型，它们在结构上有以下共同的特点：

(1)光阑片外形轮廓主要由两条同心的圆弧构成，沿圆弧各处径向宽度不变，故称等宽型光阑片。

(2)光阑片片数较多（一般有 10 片左右），长度较长，宽度较窄，不仅所构成的孔形较圆，而且在光孔开到最大时，整个光阑的外形尺寸比最大光孔的直径增加得不多。因此这种虹彩光阑适用于口径较大的摄影物镜中。

(3)定销和动销分布在光阑片的两端，两销钉之间的距离较大。对于导槽型结构来说，如图 4-11 所示的径向直槽推动动销时，光阑片的受力情况如图 4-11(a)所示。在动销 G 与导槽的接触点 M 处，动销受到导槽的正压力 N 和摩擦力 F，正压力 N 垂直于导槽，摩擦力 F 沿着导槽与动销相对滑动的方向，且与动销的滑动方向相反。N 与 F 的合力为 P，P 可以分解为 P_1 和 P_2 两个互相垂直的分力。其中 P_1 垂直于动销与定销连线方向，它是推动光阑片绕定销转动的有用分力；P_2 沿定销 G 与动销 H 的连线方向，它不但对推动光阑片的运动不起任何作用，反而会使光阑片拱曲变形，增大光阑片间的摩擦力，使这种虹彩光阑的活动环转动起来不灵便。

这个缺点在连杆型结构中同样存在，但是，如图中(*b*)所示，适当选取连杆的长度可以使连杆与 GH 连线的夹角在 90°附近变化，减小有害分力 P_2。

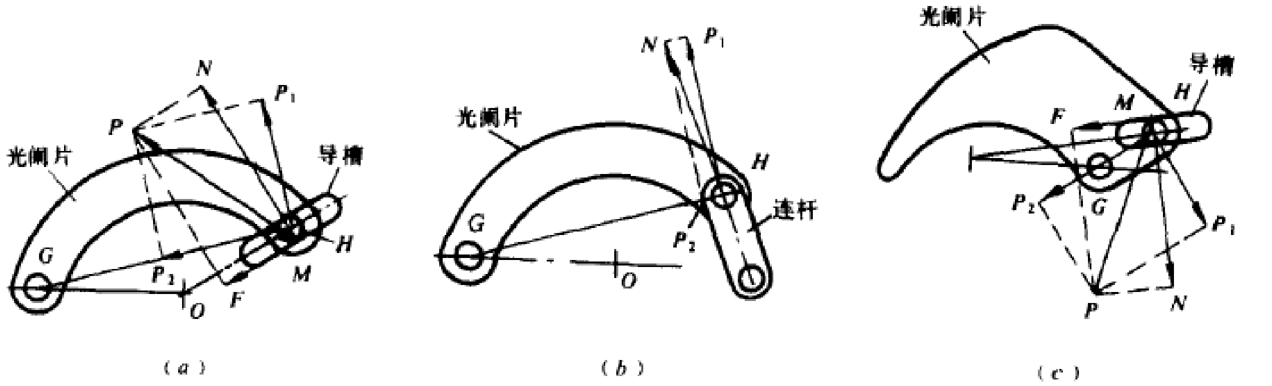


图 4-11　光阑片的受力分析

2. 光阑片不等宽的虹彩光阑　在各种口径不大的普通摄影机里广泛应用的虹彩光阑在基本结构上与前一种虹彩光阑相同，但在光阑片的形状、销钉的位置和光圈刻度的分布等方面有不同的特点。

(1)光阑片的定销和动销安排在光阑片的同一端且距离较近，因此光阑片的宽度在两销钉一端较宽并向另一端逐渐变窄，故称不等宽型光阑片。其受力分析如图 4-11(*c*)所示，导槽对动销的正压力 N 和摩擦力 F 的合力 P 也可以分解为推动光阑片绕定销转动的有用分力 P_1 和沿动销与定销连线方向且指向定销的有害分力 P_2。但是，由于动销和定销在光阑片的同一侧，所以 P_2 不会引起光阑片形成光孔的那一部分变形；而且由于定销与动销距离近，它们之间的那部分光阑片的刚度也提高了，因而 P_2 对这部分产生的变形实际上很小；加上定销和动销之间距离的缩短，增大了从动环转角至光阑片转角之间的传动比。综合以上三方面原因，使光阑片的受力更加合理，光阑机构的转动更加灵活轻便。

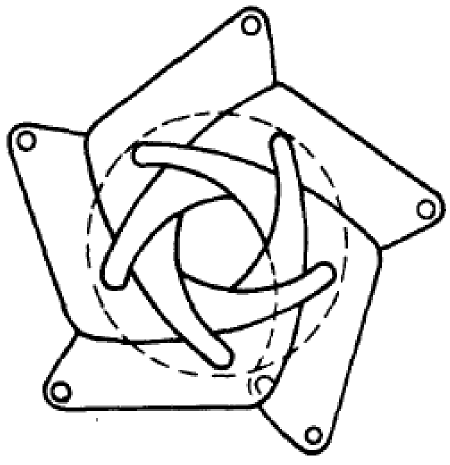


图 4-12　由 6 片不等宽型光阑片构成的虹彩光阑

(2)光阑片的数目较少，以 5 片和 6 片最为常见。图 4-12 为由 6 片不等宽型光阑片构成的可变光阑示意图。当光阑孔径较大时，为减小外形尺寸，也可以适当增多光阑片的数目。光阑片数目少有利于简化结构，便于加工和装配，也减少了机构总的摩擦阻力，提高了转动的灵便性。但光阑片数目少又使每个光阑片所需要的遮光面积增加，从而使整个光阑机构的外形尺寸比它所构成的光孔增加较多。所以这种虹彩光阑主要用在口径较小的摄影物镜中。

3. 等间隔光阑机构　无论是光阑片等宽的虹彩光阑，还是光阑片不等宽的虹彩光阑，只要推动光阑片动销运动的导槽是沿径向的直线形导槽，活动环的转角与光阑片所围成的通光孔面积之间就不是线性关系（§ 4-3 将讨论它们的定量关系）。因为光圈数按标准系列每改变一档，入瞳面积就变化一倍，所以，如果用一个光圈调节环直接拨动活动环来改变这种虹彩光阑的通光孔大小，那末在这个光圈调节环上的光圈刻度就不是等间隔

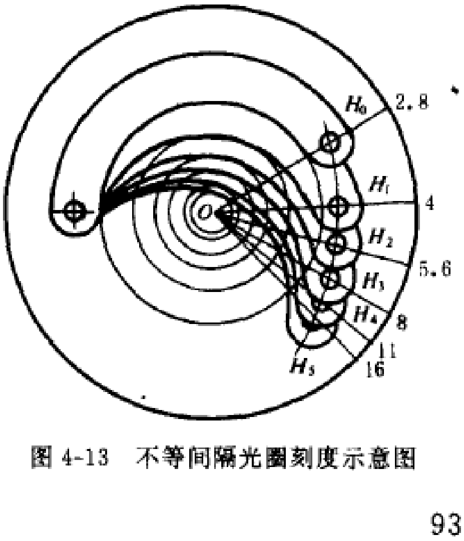


图 4-13　不等间隔光圈刻度示意图

的。图 4-13 以光阑片等宽的虹彩光阑为例画出了其中一个光阑片运动的过程。光阑片的各个位置都和一系列同心圆相切，这些同心圆就表示各档光圈时的通光孔大小。严格地说，由所有光阑片围成的光孔图形是一个多边形，这里为了便于分析，暂时用该多边形的内切圆来代替而忽略它们之间很小的差异。图上各档光孔圆的直径是按标准光圈系列的公比 $\sqrt{2}$ 递减的，并设光阑片内圆弧半径等于最大光孔圆的半径。连结光孔中心 O 与各个位置的光阑片的动销中心 H_0、H_1、…、H_5 的射线与表示动环的大圆相交得到一系列交点，这些交点的右边所标的光圈数字仅仅是示意性的，是为了形象地表示与动环一起旋转的光圈手轮上的刻度。从图上可以看出，每相邻两档光圈之间的动环转角是不相等的，因此，光圈手轮上的光圈刻度也是不等间隔的，并且光孔越小，刻度间隔也越小。这种不等间隔光阑的光圈刻度或数字刻制和使用都不方便，特别是与自动系统相联系时，必须引入一个非线性的函数关系。

所谓等间隔光阑机构就是通过适当的机构把每改变一档光圈数的活动环转角或光圈调节环转角变为等转角，使光圈调节环上的光圈刻度或刻制的光圈数字等间隔分布。图 4-9(b)所示连杆型虹彩光阑，适当选取连杆的长度有可能使活动环转角与光阑面积之间成近似的线性关系。在采用光阑片不等宽的虹彩光阑的普通照相机里，实现等间隔的机构主要有导槽式和导板式两种。

(1)导槽式等间隔光阑。图 4-14 所示为导槽式等间隔光阑的典型结构。它的特点是动环上的导槽不是径向直线形，而是按等转角要求设计的曲线。这种导槽式等间隔光阑的优点是不需要增加什么辅助零件，就能够实现等间隔化，因而结构比较简单；缺点是曲线导槽的工艺性较差，加工时要求几个曲线导槽的形状和尺寸有较好的一致性，否则就会破坏光孔形状的对称性和运动的灵便性；同时由于导槽和动销之间不可避免的间隙和摩擦，使这种光阑的光孔精度和运动灵便性都较差。这种导槽式等间隔光阑多用于中低档平视取景或双镜头反光照相机的镜头里，往往和镜间中心式快门组装在一起。

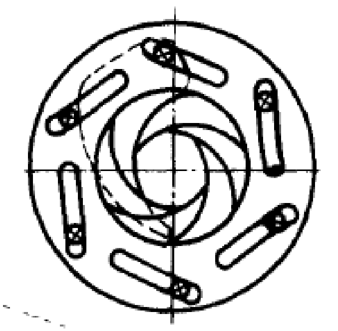


图 4-14 导槽式等间隔光阑

(2)导板式等间隔光阑。导板式等间隔光阑广泛应用在单镜头反光照相机的可换镜头内，其结构如图 4-15 所示。它的动环 3 的导槽仍是形状简单的径向直槽，因此动环对于各档光圈的转角仍是不相等的。把不等的动环转角转变为光圈调节手轮上光圈数的等间隔刻度，主要是依靠曲线导板 8。当我们旋转套在镜筒外面的光圈调节手轮 9 装定所需要的光圈数时，固定在手轮上的曲线导板 8 也就转到了某一个位置。当固定在弯杆 5 上的靠钉 7 靠在导板的曲线工作面上时，弯杆的叉形槽拨动固定在动环 3 上的销钉 4，并通过动环推动光阑片 2 把光阑孔开启到一定的大小。只要恰当地设计导板工作面的曲线，就可以控制动环的转角大小，使光阑片围成的光孔恰好与所装定的光圈数相符。

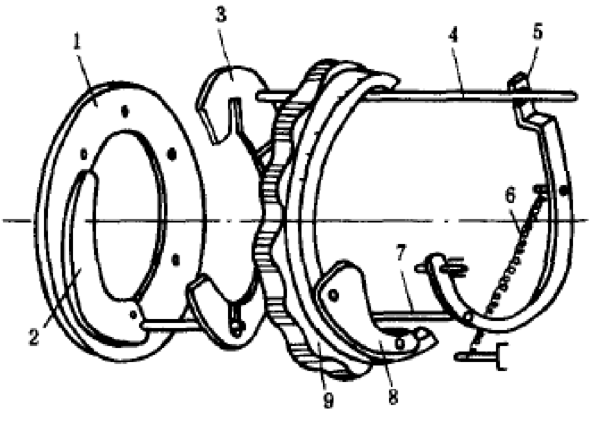


图 4-15 固定导板式等间隔预缩光阑

这种导板式等间隔光阑在结构上有一个不同于导槽式光阑的重要特点，就是导板对靠钉的约束形式是开放式的，而不象导槽对动销是封闭式的约束。开放的约束形式要靠外力来维持

约束构件与被约束构件之间的接触，拉簧 6 就是给弯杆施加外力，使靠钉始终靠向导板的。要多加个外力似乎是缺点，但是开放式约束的接触形式是单向接触，只要保证曲线导板工作面的设计和制造精度，就可以保证靠钉有准确的位置，这就提高了光阑孔的精度。而封闭式约束由于是双向接触，在导槽和动销之间不可避免的间隙必然会使机构在反向转动时产生空回和位置误差，因而降低了光阑孔的精度。这也是导板式光阑被高档照相机采用的主要原因之一。

导板对靠钉的开放式约束的另一个优点是只要克服拉簧 6 加在弯杆 5 上的外力，就可以使靠钉 7 离开导板 8 移动到所需要的任何位置，这一点正是为预缩光阑的实现提供了条件。双向约束结构的导槽式光阑是不可能实现预缩的。

所谓预缩光阑是指这种光阑机构不仅能够预先装定所需要的光圈数，而且在取景时光阑孔能保持最大开启位置，当取景完毕快门要释放时，光阑孔又能在快门打开前迅速收缩到预定的大小。预缩光阑的这种功能对于单反照相机来说是十分重要的。因为单反照相机摄影和取景都是通过同一镜头进行的，如果摄影所需装定的光圈数较大，预先把光阑孔调小了，取景时通过镜头进入取景屏的光线就少，原来明亮的景物在取景屏上看起来却显得昏暗，影响取景时观察的效果。预缩光阑机构保证取景时光阑孔始终开启在最大位置，就可以使取景屏上得到充足的照度，观察时感觉明亮舒适。

预缩机构的原理主要是不把动环直接与光圈手轮固定在一起，换句话说，在旋转光圈手轮装定光圈数时，动环并不跟着转动。在相机机身内的反光镜动作机构上有一个推杆(图中未画出)，在未按下快门释放揿钮时，它总是能克服拉簧 6 的力，使弯杆 5 推动光阑动环 3，把光孔开启到最大，同时也使靠钉 7 离开曲线导板 8 的工作面。

当取景完毕，按下快门揿钮准备拍摄时，快门与反光镜联动的机构保证在快门释放前，解除对弯杆 5 的推力，使弯杆在拉簧 6 的作用下返回，推动动环 3 使光阑孔收缩。当靠钉 7 靠到导板 8 的工作面上而被限位时，光阑也就收缩到了预定的大小。

图 4-16 所示是另一种导板式等间隔预缩光阑，它与前一种导板式预缩光阑的主要区别是曲线导板不是固定在光圈调节手轮上，而是可以绕一个固定轴摆动。在拨动光圈手轮 9 预置光圈数的同时，改变了与光圈手轮固联在一起的靠钉 7 的位置。曲线导板 8 可以绕固定在镜头壳体上的带轴螺钉 5 旋转。在扭簧 6 的作用下导板的曲线工作面始终保持与靠钉接触，因而改变靠钉的位置也就改变了导板的角位置。取景时，动环拨杆 3 受反光镜动作机构的控制保持使光阑孔全部开启的角位置。当按下快门揿扭，快门释放前，机身内的反光镜抬起并解脱对动环拨杆的控制，动环 2 在弹簧的作用下瞬间复位，也就是顺时针旋转直至与固定在导板上的挡销 4 接触而停止，这时光阑孔即自动收缩至预定的大小。

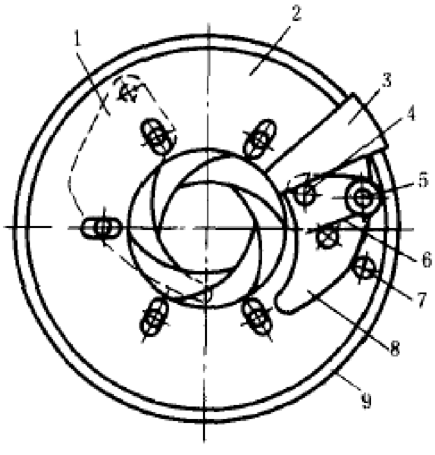


图 4-16　摆动导板式等间隔预缩光阑

§4-3　可变光阑的设计计算

虹彩光阑和双片光阑都是利用光阑片的转动来改变通光孔的大小，它们的设计方法有许多类似之处。本节着重讨论虹彩光阑的设计计算方法，对于双片光阑则主要说明它在设计上与虹彩光阑的不同之处。

4-3.1 虹彩光阑的设计计算

虹彩光阑的设计计算主要包括光阑片外形轮廓的设计，光阑孔通光面积的计算，对应各档光圈数的动环转角计算，以及等间隔机构曲线导槽和导板的设计计算等。

一、光阑片等宽的虹彩光阑设计方法

1. 等宽型光阑片外形轮廓的设计 如图 4-17 所示，这种光阑片的外形轮廓主要由两条同心圆弧构成。半径较小的圆弧边在光阑工作时用来围成孔径可变的光孔，我们把它叫做光阑片的工作边；半径较大的圆弧主要是形成必要的宽度，遮挡孔外区域的光线，故称其为挡光边。这种等宽型光阑片的外形轮廓设计，主要是根据光阑工作范围所要求的最大孔径 d_0 和最小孔径 d_{min}，以及最小不漏光原则，确定光阑片工作边和挡光边的圆弧半径 $r_内$ 和 $r_外$，它们决定了光阑片的宽度；定销与动销之间的距离 a 或两销钉对工作边圆弧中心的张角 ω，它们决定了光阑片的长度。所谓最小不漏光原则，就是要保证光阑片既有足够的重叠来遮挡孔外的光线，又有最小的外形尺寸和最少的片数。这一原则是设计各种可变光阑时必须遵循的，也适用于快门叶片的设计。按照最小不漏光原则设计这种等宽型光阑片时，片宽和片数是两个互相制约的因素，增加片宽可以减少片数，相反，增加片数可以减小片宽。光阑片宽度的增加会使光阑的外形尺寸加大，而光阑片数目过多会增加片间和光阑机构总的摩擦阻力，并限制所能构成的最小光孔，缩小光阑的工作范围。因此在设计中这两个参数往往要反复修改，直到获得满意的结果为止。

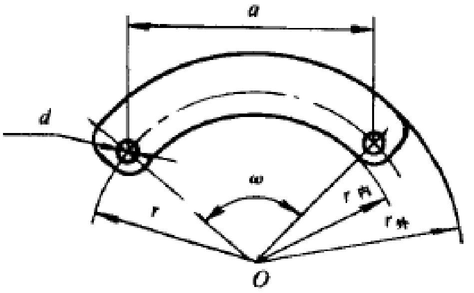


图 4-17 等宽型光阑片的外形

可变光阑的设计可用作图法或计算法进行。作图法直观易行，计算法能够得到精确的数值，所以在实际工作中两种方法往往交替使用。我们主要讨论计算法的一般步骤，实际上从讨论中所依据的几何关系很容易得到作图的方法和步骤。

(1)确定光阑片工作边圆弧半径 $r_内$。如图 4-18 所示，光阑片工作边的圆弧半径 $r_内$ 一般应取略大于物镜固定光阑孔（一般是可变光阑的固定环或活动环的孔）的半径 $d_0/2$，以免因切边现象影响最大光阑孔的面积。所谓切边现象是指当光阑孔开到最大时，光阑片的工作边切入最大光孔圆的情况。切边现象产生的原因是光阑片与定环和动环之间的销孔或槽销配合间隙，以及有关的尺寸误差造成的光阑片位置偏移。

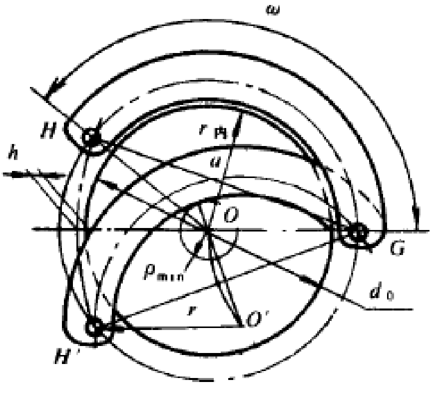


图 4-18 设计光阑片外形轮廓的几何关系

(2)确定销钉所在圆弧半径 r 和销钉孔距 a。设定销和动销位于半径为 r 的同一圆弧上。确定 r 和 a 的出发点有两个，一是要满足光阑的工作范围，二是要保证动销不从活动环的导槽内脱出。如图 4-18 所示，一般可使构成最大光孔和最小光孔时的动销位置 H 和 H' 对称于定销与光孔中心的连线 $\overline{GO}$，由图所示几何关系可得

$$r^2 = \left(\frac{r_内 - \rho_{min}}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 \tag{4-11}$$

式中 ρ_{min} 为最小光孔圆的半径，$\rho_{min}=d_{min}/2$。a 的选取应保证光阑片的动销 H 在运动到 $\overline{GO}$ 延长线上时，定销中心与活动环的孔边保持一定的距离 h，以免动销从活动环的导槽内滑脱出来，即

$$a = r + \frac{d_0}{2} + h \tag{4-12}$$

其中 h 的大小按结构选取。销钉孔对工作边圆弧中心的张角

$$\omega = 2\arcsin\frac{a}{2r} \tag{4-13}$$

将(4-12)式代入(4-11)式内并解出 r(舍去负根)可得

$$r = \frac{1}{3}\left[\left(\frac{d_0}{2}+h\right)+\sqrt{4\left(\frac{d_0}{2}+h\right)^2+3(r_{内}-\rho_{min})^2}\right] \tag{4-14}$$

(3)确定光阑片挡光边的圆弧半径 $r_{外}$ 和光阑片的宽度 W。在初选 $r_{外}$ 时可认为销钉位于光阑片的中径上，即

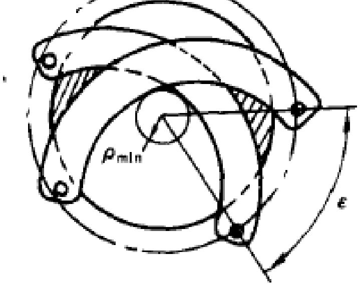
$$r_{外} = 2r - r_{内} \tag{4-15}$$

光阑片挡光边的圆弧半径 $r_{外}$ 也可以根据安装光阑的空间尺寸或从减小光阑的外形尺寸出发先选取一个初值，然后在设计中再修改。

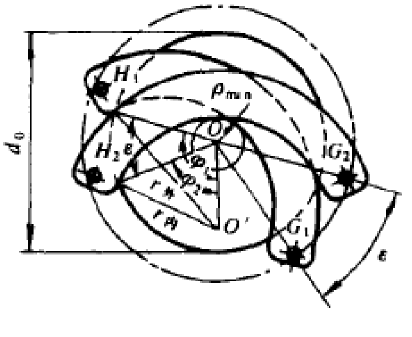
$r_{外}$ 确定后，光阑片的宽度可得

$$W = r_{外} - r_{内} \tag{4-16}$$

值得指出的是，当光阑的工作范围较大时，即 $d_0/2\rho_{min}$ 较大时，由(4-14)式计算出来的 r 值往往比光阑片的内圆弧半径 $r_{内}$ 大得较多，结果使光阑片很宽，不仅增大了光阑的外形尺寸，还可能使按最小不漏光原则计算的光阑片数目太少。解决的办法主要有两个，一是使动销向外偏离半径为 r 的圆弧线，在计算 r 时令 $h\leqslant 0$，这样就可以既减少 r 又避免动销滑出导槽；另一种方法就是采用连杆型结构，因为没有动销滑出导槽的问题，所以在计算 r 时也可以令 $h\leqslant 0$ 以减小 r 值，减小光阑片的宽度。



(a)片间漏光



(b)无漏光

图 4-19 按照最小不漏光原则确定光阑片数目

2. 光阑片数目 N 的确定 光阑片的外形轮廓初步确定后，可以根据最小不漏光原则计算光阑片的最小片数。如图 4-19 所示，相邻光阑片之间的重叠量随通光孔的减小而减小，而孔外需要遮光的面积却随光孔的减小而增大，因此，保证不漏光的最少片数应当以最小光孔为准来确定。为此，在图中画出了构成最小光孔时两相邻光阑片的位置。图 4-19(a)表示片数偏少，或两光阑片重叠角 ε 偏大，致使片间出现漏光区域；图 4-19(b)则是 ε 减小到片间无漏光区而重叠量又最小的情形，以此时的几何关系计算最少片数。由图 4-19(b)可得

$$\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2 = \arccos \frac{(d_0/2)^2 + (r_内 - \rho_{min})^2 - r_外^2}{d_0(r_内 - \rho_{min})}$$

$$- \arccos \frac{(d_0/2)^2 + (r_内 - \rho_{min})^2 - r_内^2}{d_0(r_内 - \rho_{min})} \quad (4\text{-}17)$$

$$N = 360/\varepsilon \quad (4\text{-}18)$$

由上式计算出的 N 值必须圆整成大于它的整数作为所确定的光阑片数目，这实际上等于在按最小不漏光原则设计的挡光边最小形廓的基础上增加一定的保险重叠量。如果仅靠圆整 N 所增加的重叠量还不足以遮挡由于光阑片位置的偏差可能产生的漏光区域，就要多增加一片光阑片或把挡光边的圆弧半径再增大一些。

3. 活动环转角的计算　活动环转角与光阑通光孔径之间的定量关系是计算光圈刻度的依据。图 4-20 所示为计算活动环转角的几何关系，由图可得

$$\mathrm{tg}(\beta + \omega) = \frac{a\sin(\theta - \alpha)}{r - a\cos(\theta - \alpha)}$$

其中

$$\alpha = (\pi - \omega)/2$$

所以

$$\mathrm{tg}(\beta + \omega) = \frac{\cos(\omega/2 + \alpha)}{r/a - \sin(\omega/2 + \alpha)}$$

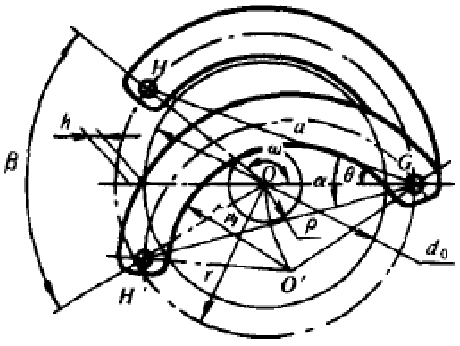


图 4-20　计算活动环转角的几何关系

则具有径向直线形导槽的活动环的转角为

$$\beta = \mathrm{arctg} \frac{\cos(\omega/2 + \alpha)}{r/a - \sin(\omega/2 + \alpha)} - \omega + \pi \quad (4\text{-}19)$$

式中

$$\alpha = 2\arcsin \frac{r_内 - \rho}{2r} \quad (4\text{-}20)$$

实际上，在光阑片摆动的范围内，可以近似认为 $\beta \approx 2\alpha$，因此常常可以用如下近似公式来计算活动环转角

$$\beta_近 \approx 4\arcsin \frac{r_内 - \rho}{2r} \quad (4\text{-}21)$$

近似公式的计算结果与精确公式的计算结果相对误差一般不超过 4%。

严格地说，虹彩光阑的通光孔形状不是一个圆，而是一个由光阑片内圆弧边构成的多边形。因为这种虹彩光阑的光阑片较多，它们所围成的孔面积与其内切圆面积相差甚小，所以可、以把内切圆近似看作等效圆，即内切圆半径

$$\rho \approx d_效 /2 \quad (4\text{-}22)$$

又由(4-2)式和(3-7)式，并令(4-10)式中 $n=1$（光圈标记只用第一系列），可得

$$\rho \approx \frac{f'}{2\beta} \times 2^{-\frac{m}{2}} \quad (4\text{-}23)$$

将该式代入(4-20)式和(4-21)式中可得

$$\alpha = 2\arcsin[a(b - 2^{-m/2})] \quad (4\text{-}24)$$

$$\beta_近 \approx 4\arcsin[a(b - 2^{-m/2})] \quad (4\text{-}25)$$

式中常数

$$a = \frac{r_内 f'}{4r\beta}, \quad b = \frac{2\beta}{f'} \quad (4\text{-}26)$$

可见 α 和 β 都是 m 的非线性函数，因此，活动环对于各档光圈数的转角是不相等的。如果

用光圈调节环直接拨动活动环，调节环上的光圈刻度就是不等间隔的。

计算实例 已知可变光阑的最大孔径 $d_0=88\text{mm}$，光阑调节范围为 $F5.6\sim F32$，计算光阑片的形廓参数、光阑片片数和对应各档光圈数的活动环转角。

取 $r_{内}=\frac{1}{2}d_0+2=46\text{mm}$

$$\rho_{min}=\frac{d_0}{2}\left(\frac{5.6}{32}\right)=7.8\text{mm}$$

取 $h=3\text{mm}$，则

$$r=\frac{1}{3}\left[\left(\frac{88}{2}+3\right)+\sqrt{4\times\left(\frac{88}{2}+3\right)^2+3\times(46-7.8)^2}\right]=53.9$$

取 $r=54\text{mm}$，可得

$$r_{外}=2\times 54-46=62\text{mm}$$

$$a=46+44+3=93\text{mm}$$

$$W=62-46=16\text{mm}$$

$$\varepsilon=\arccos\frac{44^2+(46-7.8)^2-62^2}{88\times(46-7.8)}-\arccos\frac{44^2+(46-7.8)^2-46^2}{88\times(46-7.8)}=32.65°$$

$$N=\frac{360°}{32.65°}=11.02$$

取光阑片数为 12 片。表 4-2 所列为按近似公式(4-21)计算的各档光圈数的活动环转角。由表中最右边一列数值可见，相邻两档光圈数的角间距 $\Delta\beta$ 是不相等的。

表 4-2 对应各档光圈数的活动环转角

F	d(mm)	β(°)	$\Delta\beta$(°)
5.6	88	4.2	
			27.5
8	62.2	31.7	
			19.7
11	44	51.4	
			14.0
16	31.1	65.4	
			10.2
22	22	75.6	
			7.3
32	15.6	82.9	

二、光阑片不等宽的虹彩光阑设计方法

1. 不等宽型光阑片外形轮廓的设计 图 4-21 所示是这种光阑片的外形。由图可见，不仅两销钉集中在一侧，而且这种光阑片是不等宽度的。圆弧$\widehat{ab}$是它的工作边，由它构成光孔，也有工作边是一条直线的，或一部分圆弧，一部分直线。我们主要讨论以一条圆弧作为工作边的基本型式。$\widehat{cd}$边和$\widehat{ef}$边是这种光阑片的挡光边，其余各段直线和圆弧则起连接过渡的作用。

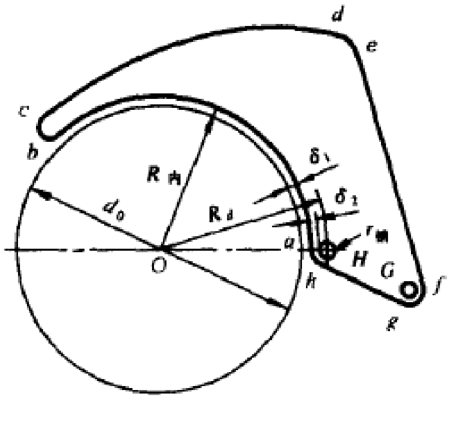


图 4-21 不等宽型光阑片的外形

工作边$\widehat{ab}$的圆弧半径 $R_{内}$ 同上面一种等宽度光阑片一样，应取略大于物镜固定光阑孔的半径 $d_0/2$。下面要着重讨论的是定销和动销位置的确定，以及挡光边的设计原则和设计方法。

(1)定销和动销位置的确定。定销和动销的位置有两种型式，一种是定销在内、动销在外，即定销与光孔中心的距离小于动销离光孔中心的距离，另一种是动销在内、定销在外。这两种结构根据光阑在镜头中的安装位置和结构的具体情况选定。这里仅讨论第一种型式，即定销在内、动销在外的型式。第二种型式的设计原则与第一种型式基本上是相同的。

如图 4-21 所示，定销中心 H 的位置主要根据必要的工艺孔边距来确定，一般可取定销中心至光孔中心的距离

$$\overline{HO} = R_d \geqslant R_{内} + r_{销} + \delta_2 \tag{4-27}$$

式中 $R_{内}$ 为光阑片工作边的圆弧半径；$r_{销}$ 为定销孔半径；δ_2 为工艺要求的最小孔边距。R_d 取大了会增大光阑的外形尺寸，所以应尽量接近工艺许可的最小值。

(2)挡光边最小形廓设计原理。挡光边 cd 和 ef 主要根据最小不漏光原则来设计。下面我们先通过光阑片的两个重叠位置来讨论挡光边的设计原理，然后再说明它的作图方法。

图 4-22 表示了两个相邻的光阑片 1 和 2 在构成最小光孔时的重叠情形。图上 Q_n 点是光阑片 2 的工作边圆弧与最大光孔圆的交点，E 点是光阑片 1 的工作边圆弧与最大光孔圆的交点，P_n 点是光阑片 1 和 2 的工作边的交点。为便于分析，先假定光阑片的整个挡光边是一条与工作边圆弧同心的圆弧，圆弧的半径为 $R_{外}$。由图可见，$R_{外}$ 不能小于光阑片 1 的圆弧中心 O_{1n} 到 Q_n 点的距离，否则若把图上用双点划线画的半径为 $R'_{外}$($R'_{外}$ 小于 O_{1n} 到 Q_n 的距离)的圆弧作为挡光边，就会出现图上用阴影线表示的漏光区。

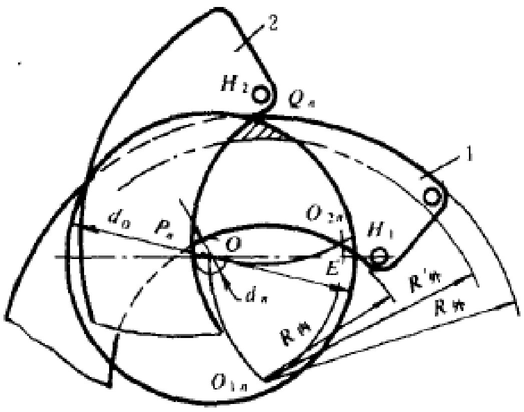


图 4-22 两个相邻的光阑片在构成最小光孔时的重叠位置

先讨论左挡光边的最小形廓应该怎样确定。由图 4-22 可见，光阑片 2 的工作边圆弧 $\overset{\frown}{P_nQ_n}$ 的位置就是这种情况下的光阑片 1 的左挡光边的理论轮廓位置。单从这张图上看，光阑片 1 在 $\overset{\frown}{P_nQ_n}$ 左方的面积是多余的。如果我们把多余的部分沿 $\overset{\frown}{P_nQ_n}$ 剪去后，再放到图 4-23 上去(图 4-23 是光阑片 1 和 2 在形成孔径为 d_i 的光孔时的重叠位置图)，随着光孔的增大，两光阑片分别绕各自的定销 H_1 和 H_2 转动了一定的角度，它们之间的重叠情况也发生了变化，在光阑片 1 的左边缘 $\overset{\frown}{P_nQ_n}$ 和光阑片 2 的工作边圆弧之间出现了漏光区 $P_iQ_iP_n$(图上用阴影线表示的区域)。可以推想，如果光孔再增大，在 Q_i 点的左方还会出现新的漏光区。由此可见，仅根据一张光阑片的重叠位置图是不能完全确定左挡边的正确位置的，应该由最小光孔开始，画出多张光阑片的重叠位置图，把出现的漏光面积逐块地添补上去，由此来形成光阑片 1 的左挡光边轮廓。

显然，用这样逐块添补的方法来作图是很不方便的。为了能在同一张图上画出左挡光边的理论轮廓，可以在每一张重叠位置图上加一个反向运动，也就是把每一张重叠图上的光阑片 1 和 2 以及最大光孔圆一起绕光阑片 1 的定销 H_1 顺时针转动 $\alpha_1 \cdots, \alpha_i \cdots, \alpha_n$ 角，结果使光阑片 1 都转回了图 4-24 所示的原始位置，即光阑片 1 的工作边圆弧中心对应各档光圈的位置 O_{11}，$\cdots, O_{1i}, \cdots, O_{1n}$ 都转回到与光孔中心 O 重合的位置，而光阑片 2 的工作边圆弧中心对应各档光圈的位置 $Q_{21}, \cdots, Q_{2i}, \cdots, O_{2n}$ 则绕 H_1 分别转动 $\alpha_1 \cdots, \alpha_i \cdots, \alpha_n$ 角，转到了 $O'_{21}, \cdots, O'_{2i}, \cdots, O'_{2n}$ 位置，相应地光阑片 2 的工作边圆弧绕 H_1 分别转到了 $\overset{\frown}{B_1B_1}, \cdots, \overset{\frown}{B_iB_i}, \cdots, \overset{\frown}{B_nB_n}$ 各个位置，这些圆弧也就是分别以 $O, O'_{21}, \cdots, O'_{2i}, \cdots, O'_{2n}$ 各点为圆心，$R_{内}$ 为半径所画的圆弧，这些圆弧的包络

线 cc 就是所求的光阑片 1 的左挡光边的最小形廓。显然 cc 与圆心为 O、半径为 $R_内$ 的圆是相切的。

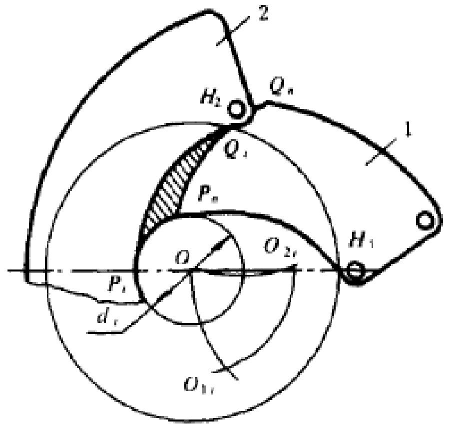


图 4-23 两个相邻的光阑片在构成孔径为 d_i 的光孔时的重叠位置

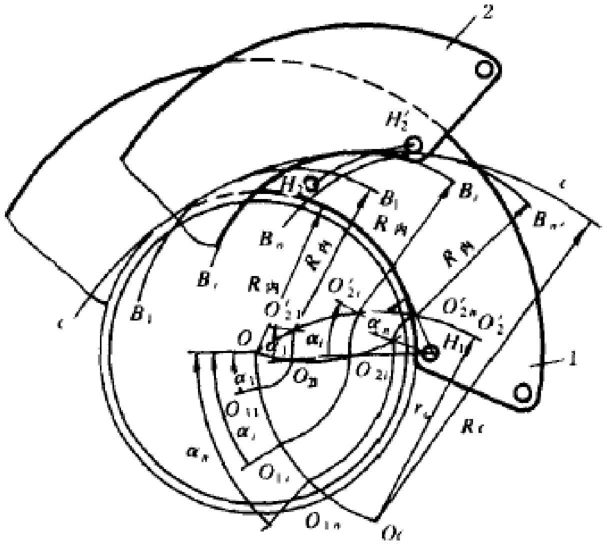


图 4-24 挡光边最小形廓的形成原理

实际上可以证明[59]用上述方法得到的所有光阑片 2 反转后的工作边圆弧中心的位置 $O'_{21},\cdots,O'_{2i},\cdots,O'_{2n}$都落在以 O_c 为圆心$\overline{OO_c}$为半径的圆弧$\widehat{OO'}_2$上。

因为$\widehat{B_1B_1},\cdots,\widehat{B_iB_i},\cdots,\widehat{B_nB_n}$各弧的圆心都在$\widehat{OO'}_2$上，所以它们的包络线$\widehat{cc}$也是一条圆弧，并且是与$\widehat{OO'}_2$同心的圆弧，其圆心就是 O_c，半径 $R_c=r_c+R_内$。

由图 4-25 所示几何关系可得圆心 Oc 的坐标为

$$x_c = R_d\left(1 - \cos\frac{2\pi}{N}\right), y_c = - R_d\sin\frac{2\pi}{N} \tag{4-28}$$

半径 $$r_c = 2R_d\sin\frac{\pi}{N} = H_1H_2 \tag{4-29}$$

以及

$$\begin{aligned}\overline{H_1O_c} &= \sqrt{(R_d - x_c)^2 + y_c^2} \\ &= \sqrt{\left[R_d - R_d\left(1 - \cos\frac{2\pi}{N}\right)\right]^2 + \left(- R_d\sin\frac{2\pi}{N}\right)^2} \\ &= R_d\end{aligned} \tag{4-30}$$

于是，可进一步得出包络线$\widehat{cc}$的以下作图法（见图 4-26）：

①以光孔中心 O 为圆心，光阑片 1 和 2 的定销中心 H_1 和 H_2 的距离$\overline{H_1H_2}$为半径画弧$\widehat{tt}$，与以 H_1 为圆心，R_d 为半径的圆弧$\widehat{OS}$相交，其交点 O_c 就是包络线$\widehat{cc}$圆心；

②以 O_c 为圆心画弧$\widehat{cc}$与半径为 $R_内$ 的圆 O 相内切，该圆弧$\widehat{cc}$就是所求的包络线，也就是光阑片左挡

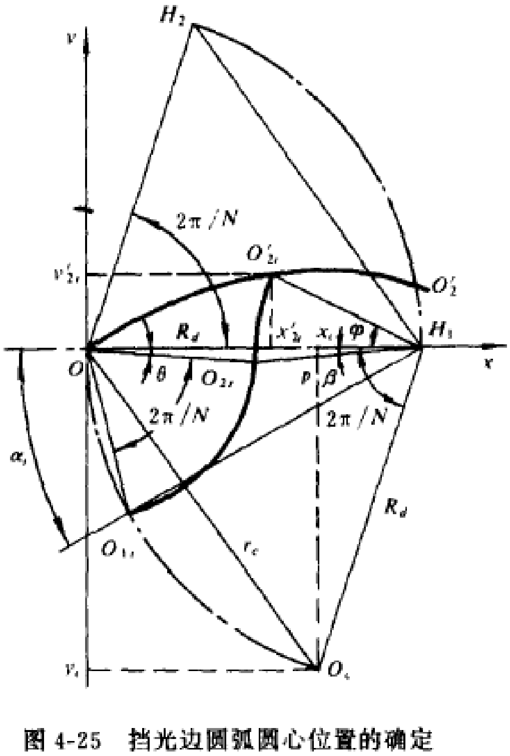


图 4-25 挡光边圆弧圆心位置的确定

光边的最小形廓；

③将 O_c 与 O 的连线延长与 $\widehat{cc}$ 相交，交点 b 就是包络线 $\widehat{cc}$ 与圆心为 O、半径为 $R_{内}$ 的圆的切点，也就是左挡光边最小形廓的左端点；

④从 H_1 出发引射线，使射线与 $\overline{H_1O}$ 所夹的角等于光阑片对应最小光孔的最大转角 α_n，该射线与以 H_1 为圆心、R_d 为半径的圆弧交于 O'_{1n} 点，该点就是光孔中心绕定销中心 H_1 反转 α_n 角到达的位置，再以 O'_{1n} 点为圆心、$d_0/2$（d_0 为光阑的最大光孔圆的直径）为半径画弧 $\widehat{AA}$ 与 $\widehat{cc}$ 交于 Q 点，该点就是光阑片左挡光边最小形廓的右端点。

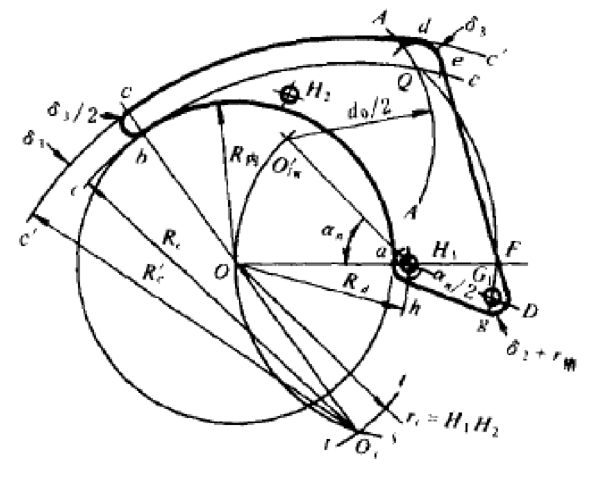


图 4-26′ 挡光边最小形廓的作图法

至此，光阑片左挡光边的最小形廓已经完全确定。然而，最小形廓没有考虑由于制造误差和配合间隙引起的光阑片之间重叠量的变化，因此，为了避免由此产生的漏光，实际轮廓应当比最小形廓略大一些，加大的部分叫做保险重叠量。设左挡光边的保险重叠量为 δ_3，则左挡光边的实际轮廓应当是以 O_c 为圆心、$R'_c=R_c+\delta_3$ 为半径的圆弧 $\widehat{c'c'}$。

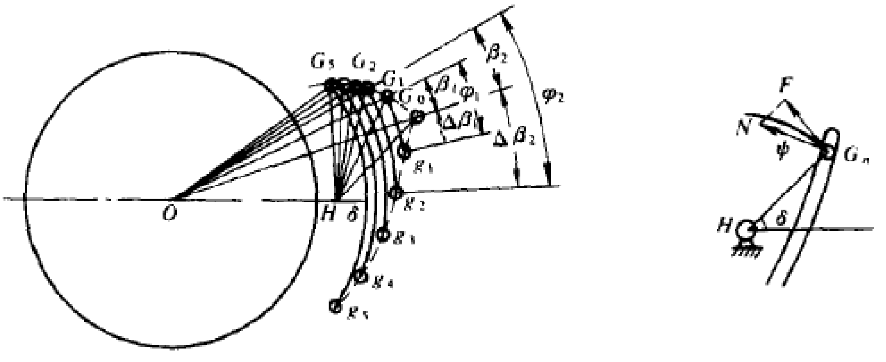
下面讨论右挡光边的设计方法。因为 $\widehat{AA}$ 就是最大光孔圆绕 H_1 反转 α_n 角后的位置，所以，如果仅仅考虑最小不漏光原则，那末图 4-26′上的 $\widehat{QA}$ 就是光阑片右挡光边的最小形廓。然而如图所示，H_1 和 G_1 都在 $\widehat{QA}$ 的右边，也就是说，定销和动销都落在光阑片的轮廓外面，这显然是不合理的。因此，光阑片右挡光边的实际轮廓应当把 $\widehat{QA}$ 和定销孔以及动销孔都包容在内。在 Q 点附近，还应当向外加大一个保险重叠量；在 G_1 点，则应考虑工艺要求的最小孔边距。右挡光边的形状可以是直线，也可以是圆弧，其中以直线形更为简单。

2. 光阑孔通光面积的计算 在讨论光阑片等宽的虹彩光阑的设计计算时，因为光阑片较多，用内切圆面积来计算光通量的误差不大。但是，这种光阑片不等宽的虹彩光阑一般只有五、六片光阑片，由它们构成的多边形光孔与内切圆的差别就较大了，特别是在小孔径的时候。这时在求对应各档光圈数的光阑片转角时，需要计算多边形光孔的实际面积，并按(4-3)式折合成等效孔径，然后与光圈数联系起来。

三、等间隔光阑机构的设计方法

1. 导槽式等间隔光阑的设计原理 导槽式等间隔光阑是怎样利用动环上的曲线导槽来实现光圈刻度的等间隔化？如图 4-27(a)，O 点是光孔中心，H 和 G 分别是光阑片上的定销和动销中心。G_0 是光孔最大时动销的初始位置，$G_1,G_2,\cdots,G_5$ 各点分别是各档光圈所对应的动销位置。$G_0,G_1,\cdots,G_5$ 各点都在以 H 为圆心的圆弧上，$\angle G_0HG_1,\angle G_0HG_2,\cdots,\angle G_0HG_5$ 各角就是光阑片对应各档光圈的转角。设 $\angle G_0OG_1=\beta_1,\angle G_0OG_2=\beta_2,\cdots$ 则 $\beta_1,\beta_2,\cdots$ 各角就是各档光圈所对应的动销相对于光孔中心 O 的转角，显然 $\beta_2-\beta_1\neq\beta_3-\beta_2\neq\beta_4-\beta_3\neq\beta_5-\beta_4$。因此，如果动销由动环上的径向直槽来拨动，那末，动环的转角必然是不等间隔的，与动环一起转动的光圈手轮上的刻度也就是不等间隔的。

现在，对于每一个动销位置都给动环加上一个附加转角 $\Delta\beta_1,\Delta\beta_2,\cdots,\Delta\beta_5$，使 $\beta_1+\Delta\beta_1=\varphi_1$、$\beta_2+\Delta\beta_2=\varphi_2,\cdots,\beta_5+\Delta\beta_5=\varphi_5$，并使 $\varphi_2-\varphi_1=\varphi_3-\varphi_2=\varphi_4-\varphi_3=\varphi_5-\varphi_4=\Delta\varphi$，$\Delta\varphi$ 是一个预先给



(a)导槽迹线的形成原理　　　　(b)导槽对动销的压力角

图 4-27　导槽式等间隔光阑曲线导槽的设计原理

定的光圈刻度角间距。于是，$G_1,G_2,\cdots,G_5$ 各点绕 O 点分别旋转 $\varphi_1,\varphi_2,\cdots,\varphi_5$ 各角，分别转到了 $g_1,g_2,\cdots,g_5$ 各点位置，连接 g_0、$g_1,\cdots,g_5$ 各点的光滑曲线就是使动环获得等转角的导槽的理论中心线，也叫做导槽迹线。这就是利用曲线导槽来实现光圈刻度等间隔化的原理，如果不需要精确计算光圈刻度，那末，上述原理也就是导槽迹线的作图方法。

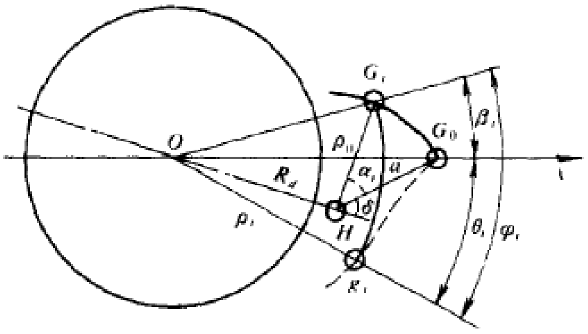


图 4-28　计算导槽迹线的几何关系

用解析法计算导槽迹线可以提高导槽设计的准确度。由图 4-28 容易得到导槽迹线的极坐标解析式。

极坐标原点选在光孔中心 O，Ox 轴通过动销的起始位置 G_0 点，则导槽迹线上的任一点 g_i 的极坐标为 $g_i(\rho_i,\theta_i)$，其坐标值为

$$\rho_i = \sqrt{R_d^2 + a^2 + 2R_d a\cos(\alpha_i + \delta)} \tag{4-31}$$

$$\theta_i = \varphi_i - \beta_i \tag{4-32}$$

而

$$\beta_i = \arccos\frac{\rho_0^2 + \rho_i^2 - 2a^2(1-\cos\alpha_i)}{2\rho_0\rho_i} \tag{4-33}$$

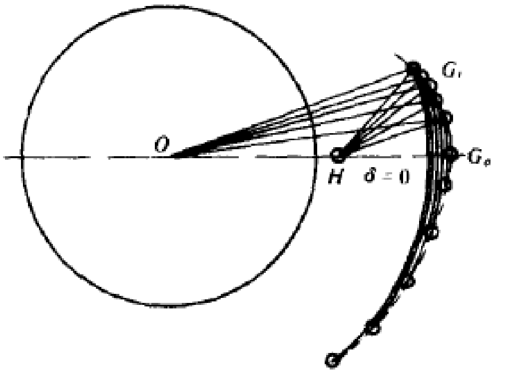
$$\rho_0 = \sqrt{2R_d^2 + a^2 + R_d a\cos\delta} \tag{4-34}$$

$$\varphi_i = i\Delta\varphi,\quad i = 0,1,2,\cdots \tag{4-35}$$

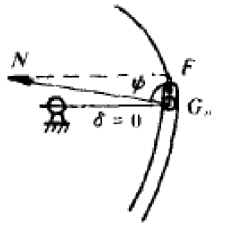
式中 R_d 为定销中心至光孔中心的距离 OH；a 为定销与动销的中心距 HG；δ 为动销的初始位置角；α_i 为光阑片对应该档光圈的转角；ρ_0 为光孔中心至动销中心的初始位置的距离，$\rho_0=OG_0$；$\Delta\varphi$ 为预定的动环（也就是光圈刻度环）等间隔角；i 为由最大孔径开始的各档光圈的序号。

按上列解析式计算出导槽迹线上各点的坐标后，为制造方便，往往用一两段圆弧或直线近似地连结各点作为导槽的实际中心线。连结的方法有放大比例作图的方法和曲线拟合的方法两种，后者可参考有关的数学专著。

这里需要指出的是动销初始角 δ 的选取问题。对于导槽式等间隔光阑来说，δ 应取得大些，一般常在 45°以上。试比较图 4-27 和图 4-29 中的导槽形状和位置，图 4-29 中的动销初始位置角 $\delta=0$，图 4-27 中的 δ 略大于 45°，其它各参数均相同。结果图 4-29 上的导槽对光孔圆的圆弧线倾角太小，在推动动销运动时，压力角 ψ 太大（见图 4-29(b)），不仅传动误差大而且费力；图 4-27(b)所示压力角 ψ 较小，传动误差就小而且省力。当然，δ 也不应该太大，以免造成对应最小光孔的动销位置 G_n 点进入最大光孔圆，而动环上的导槽是不可能伸入动环内孔的。因此，在计算导槽迹线之前，应当用作图法，在以定销 H 为圆心，定销与动销中心距 a 为半径的圆弧



(a)$\delta=0$ 时的导槽迹线



(b)导槽对动销的压力角

图 4-29　动销压力角 $\delta=0$ 时的导槽迹线和压力角

上，根据光阑片的最大转角先确定$\widehat{G_0G_n}$弧段的合适位置，可以使 G_n 点尽量靠近最大光孔圆，但又与最大光孔圆保持足够的工艺孔边距，由此确定动销的初始位置角 δ。

2. 导板式等间隔光阑的设计原理　导板式等间隔光阑与导槽式等间隔光阑的区别是它的动环导槽仍是径向直线导槽，因此它的各档光圈的动环转角仍然是不等间隔的。曲线导板是把不等间隔的动环转角转化为等间隔的光圈刻度的关键元件，因此，导板式等间隔光阑设计的主要问题是正确设计曲线导板的工作面曲线，这实际就是一个一般的平面凸轮的设计问题。

现以图 4-15 所示结构为例说明曲线导板 8 的设计原理。图 4-30 把曲线导板 8、弯杆 5、靠钉 7 和动环拨销 4 画在一个平面上，以便于分析各构件之间的几何关系。由图可见，导板工作面的理论轮廓应满足这样的关系，当导板 8 随着光圈手轮 9(见图 4-15)绕光轴 O 转过角 φ 时，推动弯杆 5 上的靠钉 7 绕弯杆的转轴 O' 从起始位置 B_0 转过一个 γ_i 角到 B_i 位置，弯杆另一端的 U 形槽拨动动环拨销 4 使动环旋转 β_i 角，动环 3 上的径向直槽拨动光阑片绕定销转动 α_i 角，这时，光阑片工作边围成的光孔面积 S_i 应与光圈手轮上预置的该档光圈数准确地相符。

下面推导导板工作面理论轮廓的解析式。极坐标原点仍取在光孔中心 O，导板工作面理论轮廓曲线上某一点 B_i 的极坐标可表为(ρ_i, θ_i)。由图 4-30 可得

$$\rho_i = OB_i = \sqrt{R_w^2 + l_w^2 - 2R_w l_w \cos(\gamma_0 + \gamma_i)} \tag{4-36}$$

$$\theta_i = \varphi - \lambda_i \tag{4-37}$$

$$\lambda_i = \arccos \frac{m^2 + \rho_i^2 - 2l_w^2(1 - \cos\gamma_i)}{2m\rho_i} \tag{4-38}$$

$$\theta_i = \varphi - \arccos \frac{m^2 + \rho_i^2 - 2l_w^2(1 - \cos\gamma_i)}{2m\rho_i} \tag{4-39}$$

$$\varphi = i\Delta\varphi \qquad i = 0,1,2,\cdots \tag{4-40}$$

$$\begin{aligned}\gamma_i &= \angle A_0O'O + \angle OO'A_i \\ &= \operatorname{arctg} \frac{R_b\sin\omega_0}{R_b\cos\omega_0 + R_w} + \operatorname{arctg} \frac{R_b\sin(\beta_i - \omega_0)}{R_b\cos(\beta_i - \omega_0) + R_w}\end{aligned} \tag{4-41}$$

由图 4-31 得

$$\begin{aligned}\beta_i &= \angle G_0OH + \angle HOG_i \\ &= \operatorname{arctg} \frac{a\sin\alpha_0}{a\cos\alpha_0 + R_d} + \operatorname{arctg} \frac{a\sin(\alpha_i - \alpha_0)}{a\cos(\alpha_i - \alpha_0) + R_d}\end{aligned} \tag{4-42}$$

上列诸式中除 α_i 和 φ 外，都是结构参数。

需要指出的是动销初始位置角 α_0 的选取与导槽式等间隔光阑不同。因为推动动销的动环

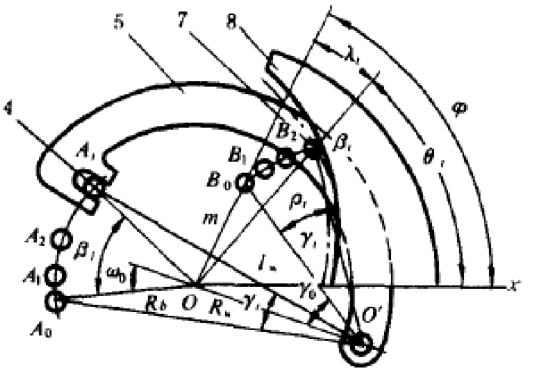


图 4-30 导板式等间隔光阑曲线导板的设计原理

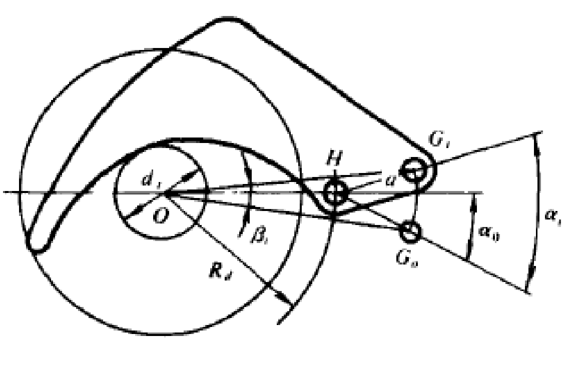


图 4-31 由光阑片转角 α 计算动环转角 β 的几何关系

导槽是径向直槽，所以从减少压力角的要求出发，使 $\alpha_0=-\alpha_n/2$（α_n 是光阑片从形成最大光孔至最小光孔所转过的角度）。

此外，为减小导板推动靠钉时的压力角，应使 l_w 大致与 R_w 差不多大小。l_w 太小，虽然可以减小压力角，却使由 γ_i 到 β_i 的传动比过大，因而降低光阑孔径的精度；l_w 太大，虽然可以减小 γ_i 到 β_i 的传动比，但会增大导板对靠钉的压力角，结果不仅仍会增大光阑孔径误差，而且会使导板尺寸增大。

导板的曲线工作面可以采用高效率、高精度的数控线切割机床加工，为此需把按各档光圈求得的各个离散点用光滑连续的曲线连结起来，然后再求出考虑靠钉半径后的导板实际轮廓。

用一条光滑的曲线把离散点连结起来的问题要用计算数学中数值逼近的方法来解决。目前，用于光阑导板设计的主要有拉格朗日插值多项式、样条函数和优化设计等方法。前一种方法在离散点的数目较少时可以得到较高的精度，在离散点数目较多的情况下，由于高次多项式的不稳定性，插值曲线在插值点之间会出现多余的拐点，导致某些地方误差很大。这时，运用样条函数逼近比较理想，因为二次或三次的低次多项式比较稳定，没有多余的拐点，只要各段低次曲线彼此光滑衔接，就能够得到一条光滑的工作面曲线来逼近理论曲线。也可以用优化设计的方法使给定曲线各离散点的均方误差最小。在电子计算机的辅助下不难得到足够的逼近精度。具体的计算方法可参看有关的计算数学书籍。

4-3.2 双片光阑的设计计算

1. 双片光阑的光阑片外形轮廓设计 双片光阑的光阑片的外形轮廓同样包括构成通光孔的工作边，遮挡孔外光线的挡光边和连接边以及过渡圆角。

(1)工作边的确定。由于双片光阑构成的通光孔只有两片光阑片，所以，为了构成完整的通光孔形，并且不使开孔较小时孔形过扁，光阑片的工作边不是一条简单的直线或圆弧，而是由若干段直线或圆弧构成的。例如，图 4-5 所示直移式光阑中的光阑片工作边为由两段直线构成的折线边；图 4-6 中的光阑片工作边主要由两段直线和一段圆弧构成；图 4-32(a)中的光阑片工作边由一段大圆弧和大圆弧中央内凹的小圆弧以及大小圆弧之间的过渡圆弧构成。也有的不用圆弧过渡，而用两条直线过渡[(图 4-32(b)]。不论是用圆弧过渡还是用直线过渡，这种双圆弧光阑都是为了增大小孔径那几档的光阑片转角。

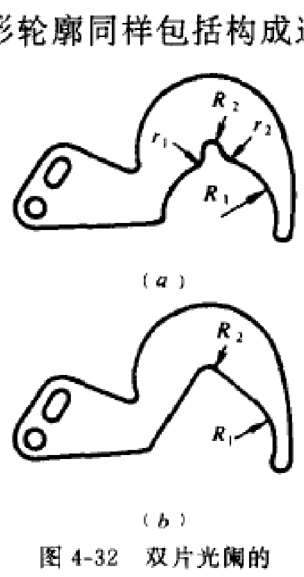


图 4-32 双片光阑的光阑片外形

对于主要由两段直线构成的折线型工作边，在设计时主要是适当选取两直线段之间的夹角，夹角太小或太大都会使孔形过扁或增大光阑片的外形尺寸，一般取 90°或略大于 90°为宜。对于双圆弧光阑，其大圆弧半径和虹彩光阑片的单圆弧边一样，取得要比固定光阑的圆孔半径略大一些，以免发生切边现象；其小圆弧的半径可以取光阑工作范围的最小光孔半径，这样在双片光阑形成最小光孔时恰好是一个圆孔。小圆弧的圆心位置要选取适当，增大小圆弧圆心与大圆弧圆心的距离，虽然可以增大光阑片小孔径那几档的转角，但也增大了光阑片的全转角和光阑片本身的尺寸，结果会使整个光阑的外形尺寸增大。

不论工作边的形状如何，双片光阑工作边的设计都要通过作图反复修改。

双片光阑由于光阑片片数少，工作边又由少数简单的曲线构成，因此，一般来说，都是不等间隔光阑，但适当选择工作边的曲线，可以近似地实现等间隔的要求。在一些低档的小型照相机里就简单地把光圈刻度刻成等间隔。

(2)挡光边的设计原理和方法。现以双圆弧边光阑片为例说明它的挡光边的设计原理和方法(见图 4-33)。

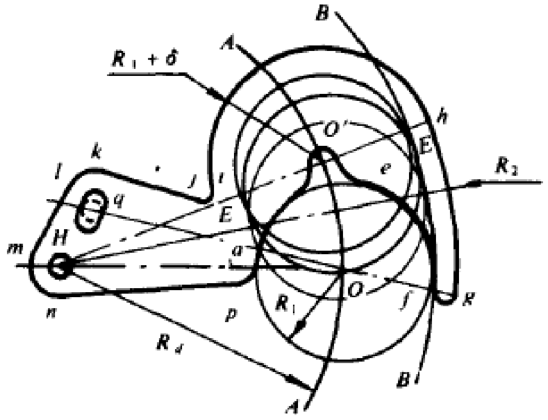


图 4-33　挡光边的形成原理

由于光阑片绕定销(孔)H 运动，因此可以利用相对运动的原理，令光阑片静止不动，则最大光孔圆相对于光阑片沿$\widehat{AA}$运动而画出一系列圆。当最大光孔圆的圆心运动到小圆弧圆心 O' 处时，相当于光阑片形成最小光孔的位置，这时$\widehat{EEE}$和上述一系列圆的包络线$\widehat{BB}$就是保证不漏光的挡光边最小形廓位置，再加上适当的保险重叠量，就可以得到挡光边的实际轮廓。

挡光边实际轮廓的作图方法如下：先以工作边小圆弧的圆心 O' 为圆心，$R_1+\delta$(R_1 是工作边大圆弧的半径)为半径作圆弧$\widehat{hi}$，再以定销孔中心 H 为圆心，$R_2=R_d+R_1+\delta$(R_d 是定销孔中心至光孔中心的距离)为半径画圆弧$\widehat{gh}$与$\widehat{hi}$相切于 h 点。

(3)动销长孔位置的确定。主要考虑拨杆拨动光阑片时的压力角和具体的结构情况。长孔的位置确定后，加上适当的工艺孔边距，连接边$\widehat{lm}$和圆角$\widehat{kl}$、$\widehat{mn}$即可确定。连接边$\overline{jk}$和$\overline{np}$以及过渡圆角$\widehat{ij}$和$\widehat{pa}$都根据具体结构来定。

工作边$\widehat{ef}$和挡光边$\widehat{hg}$的端点 f 和 g 的位置应考虑两光阑片之间有一定的搭接，为此，可取拨销在长孔内的平均位置 q 点与光孔中心 O 点连线$\widehat{qo}$的延长线与$\widehat{BB}$及$\widehat{hg}$的交点作为 f 点和 g 点，然后再把 f、g 用小圆弧光滑地连接起来。至此，光阑片的外形轮廓全部完成。

2. 光阑孔通光面积的计算　双片光阑的通光孔形状不像虹彩光阑那样有规则。如图 4-32 所示的光阑片工作边往往由两条或两条以上的圆弧或直线组成，由这样的两片光阑片围成的光孔形状，虽然也是多边形，但并不对称于光孔中心，而且孔形还随光孔的大小而改变。这在一定的程度上增加了通光面积计算的复杂性。不过绝大多数光阑片的工作边毕竟只是由简单的直线和圆弧组成，所以还是可以用解析的方法来计算。在有电子计算机辅助设计的情况下，用数值积分的方法计算这种不很规则的平面图形的面积，往往可以使程序简化并具有较好的通用性。

第五章 快　　门

§ 5-1 概　　述

一、快门的作用

快门在摄影仪器里的作用是，控制从被摄物来的光线在一段确定时间内落到摄影机内的感光材料上，使感光材料曝光。快门和可变光阑在摄影仪器中共同担负着控制和调节像面曝光量的任务，光阑以其通光孔径限制成像光束的粗细，决定像点的照度；快门则控制光束对感光材料的作用时间，即曝光时间。当外界光线的强度或感光材料的感光度改变时，快门机构要能够调节曝光时间的长短，使感光材料获得所需要的曝光量。

当被摄景物与摄影机之间有相对运动时，如航空摄影或在地面上拍摄运动物体的情形，快门的曝光时间还是决定影像相对于底片的位移量，即像移量的因素。在这种情况下，往往采用较短的曝光时间，把像移量控制在保证影像清晰度所允许的范围内。

二、快门的主要类型

快门可按它在摄影机中的位置分成物镜快门（或称镜头快门）和焦面快门两大类。物镜快门位于摄影物镜的几个光组之间（镜间快门）或紧靠在物镜前后（镜前快门或镜后快门），它还可以按结构的不同分成中心快门和百叶窗快门两类。焦面快门紧靠在感光材料前面，也可分成帘幕快门和缝隙快门两类。

中心快门一般用数片叶片来遮断光束，叶片的旋转轴平行于物镜的光轴。如图 5-1 所示，当快门工作时，叶片从中心对称地向外打开物镜光孔。中心快门的主要特点是，只要快门打开一点，感光材料上的全部像点（整个幅面）都同时曝光。

近年来，在小型自动或半自动控制曝光的平视取景照相机中广泛采用一种双叶片中心快门。这种快门既控制曝光时间，又限制光束口径，实际上是把快门机构和可变光阑机构合为一体，快门速度和光圈大小按照机构或电子线路设定的程序变化，故称为程序快门。

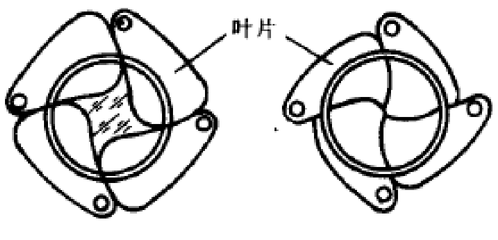


图 5-1　中心快门

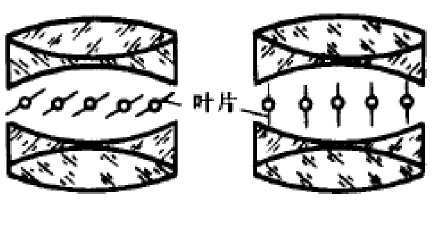


图 5-2　百叶窗快门

百叶窗快门由一组旋转轴与光轴垂直的薄片板平行排列或沿径向辐射状排列组成，片板的数目一般在 10 片上下。如图 5-2 所示，片板一起绕各自的转轴向同一个方向旋转，就可以打开或关闭物镜光孔。这种快门的主要特点是，每个片板的宽度较小，而总加起来却可以遮断较

大面积的物镜光孔，因此主要用在物镜口径较大的摄影系统中，如长焦距航空摄影机、远程摄影经纬仪等。

帘幕快门控制像面上感光材料曝光的是一个带狭缝或二个能构成狭缝的布帘或金属帘，曝光时，帘幕上的狭缝在感光材料前面通过(图 5-3)，使感光材料逐条曝光。帘幕快门既适用于大像幅摄影机，也适用于小像幅摄影机。在现代使用 35mm 胶片的照相机中出现了一种新型的纵走式钢片快门，这种快门以安装在平板上的两组可重叠可展开的薄钢片代替了布帘或金属帘传统的卷筒(卷帘)结构，并使曝光缝的运动方向由沿有效像幅的长边方向(横走)改为沿短边方向(纵走)。钢片快门的优点是能够获得与闪光灯同步的更短的曝光时间，结构简单，不易受温度和湿度变化的影响，可靠性好，使用寿命长，便于专业化工厂大批量生产。

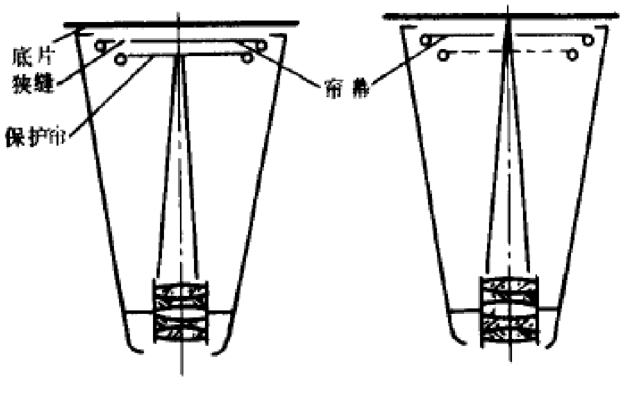


图 5-3 帘幕快门

缝隙快门指的是在焦平面前的狭缝，如第二章里介绍的缝隙式航空摄影机和全景摄影机里那样，感光材料连续不断地在这个狭缝后面通过，逐条接受曝光。因此，缝隙快门也可看作是帘幕快门的一种变型。

帘幕快门的主要特点是，由于遮断的每一个象点的光束很细，因此能够得到很短的曝光时间，同时通光效率很高，但由于整个象幅是随着帘缝的移动逐条完成曝光的，因此当影象与胶片之间有相对运动(拍摄动体或摄影机是运动的)时，会有影象变形。

三、快门的主要特性

1. 快门通光特性曲线 无论哪一种类型的快门，工作时实际上都不是瞬时间开放或遮断像点的整个成像光束的。在快门工作过程中，被打开的物镜光孔面积(或成像光束截面积)，从零开始逐渐增大，达到最大值后又逐渐减小，直到最后全部被遮断。因此，感光材料上任何一点的曝光过程可以用一条叫做快门通光特性曲线的图形来表示(图 5-4)。特性曲线描述了被快门打开的成像光束截面积 S 随快门工作时间 t 的变化。若不考虑快门开启时被摄景物光强的变化，特性曲线的纵坐标也可以是像面上给定点的照度 E。因为摄影物镜像面照度分布是不均匀的，不同像点的成像光束被快门打开或遮断的截面积和时间也可能不同，所以即使是同一快门，像面上不同像点的通光特性曲线也不会完全相同。所以，快门的通光特性曲线是对像面上某一个像点而言的。

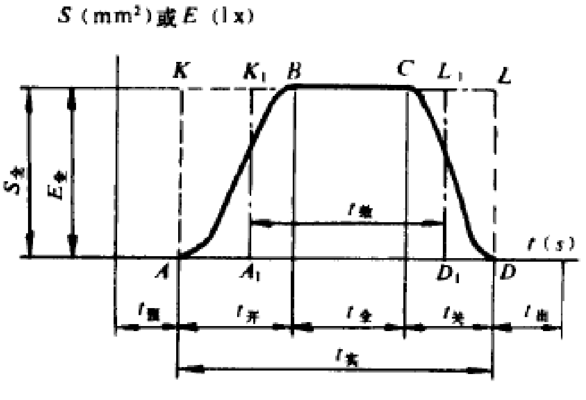


图 5-4 快门通光特性曲线

由图可见，在一般情形中，快门的工作过程可以分为五个阶段：

(1)预跑阶段，为了防止漏光，快门叶片或帘幕之间总有一定的搭接，因此需要先行打开这段搭接部分，并使叶片或帘幕达到要求的速度。

(2)打开阶段，成像光束截面积或像点的照度由零变到最大。

(3)全开阶段，成像光束截面积保持最大值不变。

(4)关闭阶段，成像光束截面积由最大减小到零。

(5)跑出阶段，恢复叶片间的重叠搭接状态，并使叶片或帘幕制动。

由快门通光特性曲线可以得出表征快门特性的定量指标：实际曝光时间、通光效率和有效曝光时间。

2. 实际曝光时间 $t_{实}$ 在快门工作过程中，像点接受曝光量的全部持续时间叫做快门的实际曝光时间。因为像点的成像光束在快门的预跑阶段和跑出阶段仍然被遮断，所以实际曝光时间等于快门的打开阶段的持续时间（打开时间）$t_{开}$、全开阶段的持续时间（全开时间）$t_{全}$ 和关闭阶段的持续时间（关闭时间）之和，即

$$t_{实} = t_{开} + t_{全} + t_{关} \tag{5-1}$$

3. 通光效率 η 快门工作各个阶段的曝光量分别为各段曲线下的面积

$$H_{开} = \int_{t_{预}}^{t_{预}+t_{开}} E(t)\mathrm{d}t = \int_{t_{开}} E(t)\mathrm{d}t \tag{5-2}$$

$$H_{全} = \int_{t_{全}} E(t)\mathrm{d}t = E_{全}\, t_{全} \tag{5-3}$$

$$H_{关} = \int_{t_{关}} E(t)\mathrm{d}t \tag{5-4}$$

因此，在快门全部工作时间内，通过快门使曝光象点得到的总曝光量为

$$\begin{aligned} H = H_{开} + H_{全} + H_{关} &= \int_{t_{实}} E(t)\mathrm{d}t \\ &= \int_{t_{开}} E(t)\mathrm{d}t + \int_{t_{全}} E(t)\mathrm{d}t + \int_{t_{关}} E(t)\mathrm{d}t \end{aligned} \tag{5-5}$$

我们设想一种理想快门，它的 $t_{开}=t_{关}=0$，即快门一打开就是全部打开，一关闭就是全部闭上。它的通光特性曲线显然应该是一个矩形。实际快门的通光特性曲线愈是接近理想快门的通光特性曲线，象点所接受的曝光量就愈多。于是，我们可以定义快门的一个通光特性，叫通光效率（或简称快门效率）。

通光效率 η 就是在快门工作时间（实际曝光时间）内，通过快门使感光材料的任一点所接受的曝光量，与在同样时间内通过理想快门使同一点所接受的曝光量之比

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{面积 } ABCD}{\text{面积 } AKLD} = \frac{\int_{t_{实}} E(t)\mathrm{d}t}{E_{全}\, t_{实}} \\ &= \frac{\int_{t_{开}} E(t)\mathrm{d}t + \int_{t_{全}} E(t)\mathrm{d}t + \int_{t_{关}} E(t)\mathrm{d}t}{E_{全}\, t_{实}} \end{aligned} \tag{5-6}$$

如设打开阶段、全开阶段和关闭阶段的通光效率分别为

$$\eta_{开} = \int_{t_{开}} E(t)\mathrm{d}t / E_{全}\, t_{开} \tag{5-7}$$

$$\eta_{全} = \int_{t_{全}} E(t)\mathrm{d}t / E_{全}\, t_{全} = 1 \tag{5-8}$$

$$\eta_{关} = \int_{t_{关}} E(t)\mathrm{d}t / E_{全}\, t_{关} \tag{5-9}$$

则快门的通光效率可写成

$$\eta = \frac{t_{开}\, \eta_{开} + t_{全} + t_{关}\, \eta_{关}}{t_{实}} \tag{5-10}$$

又，由(5-1)式有 $t_{全}=t_{实}-t_{开}-t_{关}$，则(5-10)式还可写成

$$\eta = 1 - \frac{t_{开}(1-\eta_{开}) + t_{关}(1-\eta_{关})}{t_{实}} \tag{5-11}$$

一般说来，快门通光特性曲线的打开阶段和关闭阶段是不对称的。但为了简化以后的讨论，假设 $t_{开}=t_{关}$，$\eta_{开}=\eta_{关}$(这在一定的结构时是可能实现的，它决定于快门零件在打开阶段和关闭阶段的速度以及工作边的形状)。这时，快门的通光效率即为

$$\eta = 1 - 2(1-\eta_{开})\frac{t_{开}}{t_{实}} \tag{5-12}$$

从上式可以看出，为要提高快门的通光效率，需要提高快门打开阶段的通光效率，或是缩小打开时间与实际曝光时间之比，即需要增大全开阶段的持续时间。

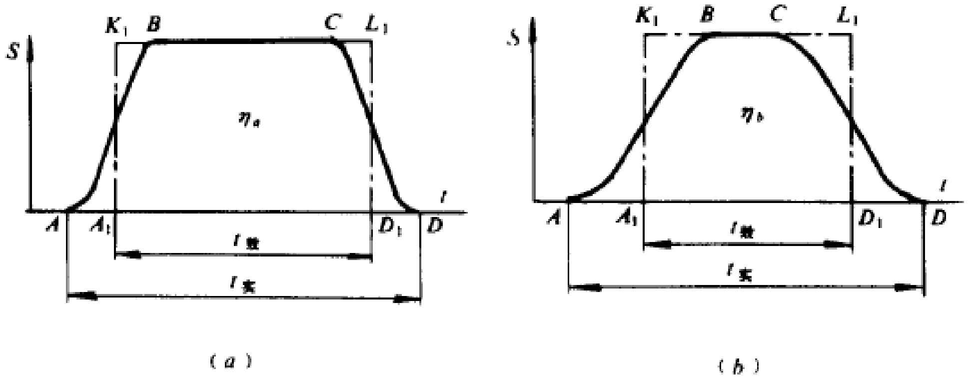


图 5-5 两种快门通光特性曲线的比较

4. 有效曝光时间 $t_{效}$ 比较图 5-5 中(*a*)和(*b*)表示的两个快门通光特性曲线，它们的实际曝光时间虽然相同，但通光效率不同。显然，曲线下面积较大的快门(*a*)能使像点获得的曝光量比快门(*b*)多，即通光效率 $\eta_a>\eta_b$。因此，实际曝光时间虽然能够表示感光材料受到光线作用的时间长短，却不能说明它接受曝光量的多少。为此，我们再假设一个理想快门，它的通光特性曲线如图 5-4 和图 5-5 中矩形 $A_1K_1L_1D_1$ 所示。令该矩形的面积等于实际快门通光特性曲线 $ABCD$ 下的面积，也就是使像点通过该理想快门所获得的曝光量与通过实际快门所获得的曝光量相等，我们就把该理想快门的曝光时间叫做实际快门的有效曝光时间 $t_{效}$。显然，图 5-5(*a*)和(*b*)表示的两个快门的有效曝光时间是不一样的。

按照有效曝光时间的定义可以把快门的通光效率写成有效曝光时间与实际曝光时间之比，即

$$\eta = \frac{t_{效}}{t_{实}} \tag{5-13}$$

因此，有效曝光时间就等于快门通光效率与实际曝光时间的乘积

$$t_{效} = \eta t_{实} \tag{5-14}$$

因为有效曝光时间能够说明像点实际所接受的曝光量，所以摄影仪器是用有效曝光时间而不是用实际曝光时间来标记快门速度的。有效曝光时间的标准系列各国大体统一，是一个近似以 1/2 为公比的数列

$$t \approx (1/2)^n, n = \cdots, -2, -1, 0, 1, 2, \cdots \tag{5-15}$$

其常用数值(以秒为单位)如下：

4，2，1，1/2，1/4，1/8，1/15，1/30，1/60，1/125，1/250，1/500，1/1000，1/2000 等。

为在快门调速盘上刻制数字的方便，小于 1s 的各档数值一般用它们的倒数表示，例如

1/2s不用 1/2 标记，而用 2 标记等。

此外，表征快门性能的指标还有最短曝光时间、曝光时间调节范围和快门通光孔径的大小等。

四、对快门的基本要求

(1)保证给定的曝光时间大小和范围；

(2)保证相片上所有各点的曝光时间一致；

(3)保证不致于由于快门工作而引起影象变形；

(4)保证不致于由于快门工作而引起分辨率的降低；

(5)结构尽量简单，使用简便；

(6)工作可靠，性能稳定。

五、快门机构的主要组成部分

(1)快门叶片(或帘幕)及叶片驱动机构。叶片的驱动机构一般包括上紧机构、释放机构和动力源三部分。作为快门叶片的动力源可以是弹簧、电机或电磁铁。

(2)曝光时间的装定和调节机构。

(3)为了防止胶片重复曝光，一般有与卷片机构相联的锁定机构。

(4)当与自动调节曝光系统连接时，还有自动装定曝光时间的机构。

(5)当与人工光源结合使用时，还有协调两者动作的同步连动机构。

(6)在有些型式的快门中(例如单帘快门、百叶窗快门)，快门本身不能防止漏光，这就另外需要专门的防漏光的镜头盖或保护帘，以及协调它们之间动作的机构。

(7)在多数普通相机中，还有叫做自拍机的快门动作延迟机构。

§5-2　中心快门

5-2.1　中心快门的类型和结构

中心快门的结构型式很多。按叶片的数目可分为双叶片快门和多叶片快门两类；按叶片的运动方式可分为单向运动的中心快门、反复运动的中心快门、双层中心快门和高速中心快门等类型。中心快门叶片的驱动方式有以弹簧为动力源的机械驱动方式和以电机或电磁铁为动力源的电驱动方式；曝光时间的控制方式有用机械调速器控制的和用电子线路控制的两类，后者即所谓的电子快门。

一、双叶片快门和多叶片快门

从中心对称地打开物镜的光孔是中心快门的基本特征。单个叶片只能从边缘切入或退出光孔，所以中心快门至少要有两个叶片。双叶片快门虽然结构简单，但是叶片数目越少，遮盖光孔所需的单个叶片尺寸越大，所以双叶片中心快门不宜用于物镜口径较大的摄影仪器。目前，它在小型照相机中的主要型式是光阑和快门合一的程序快门，§5-3 将叙述它的结构和工作原理。本节主要介绍多叶片中心快门。

多叶片中心快门的叶片数目有 3 片、4 片、5 片等，其中 5 叶片中心快门无论在航空摄影机或小型照相机中都有比较广泛的应用。根据对中心快门特性的分析(见 5-2.2)，当叶片数目超过 5 片之后，快门的性能并无显著提高，快门的结构却过于复杂。运动零件数目过多反而使摩擦损耗增加，机械效率下降。因此，在小型照相机中的多叶片中心快门，叶片的数目一般不超过 5 片。在某些航空摄影机中的双层中心快门，两层叶片的总数可以达到 8～10 片，但每一层的叶片数目仍然不超过 5 片。

二、单向运动的中心快门

这种快门叶片的运动特点是，在快门每一次曝光过程中，从打开物镜的光孔到关闭物镜的光孔，叶片的运动方向不变。

图 5-6 所示为一种航空摄影机的中心快门。这种快门的动力源是两根压簧 21。当快门电机 12 经齿轮 15、16、蜗杆 13、蜗轮 18、齿轮 17 的传动使弹簧筒 20 向右移动时，由于齿条 6 被电磁铁 9 的衔铁 10 挡住，不能移动，于是左边的压簧 21 被压缩上紧。弹簧筒移动一定距离后，通过微动开关 S_1、S_2、S_3 和 S_4 所控制的电路，使电机停止转动，快门的上紧过程完毕。

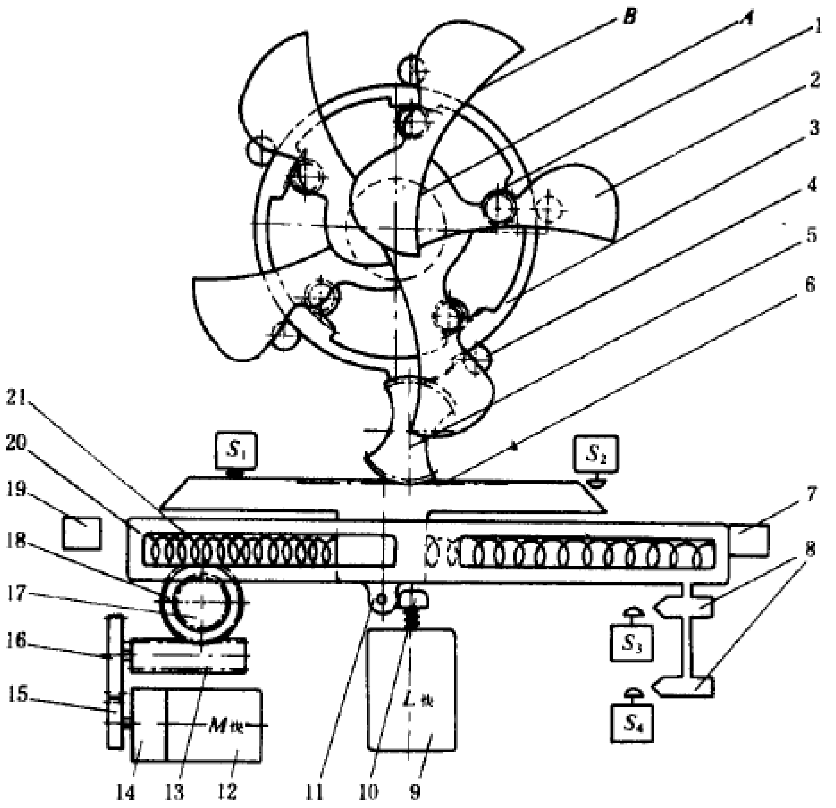


图 5-6 单向运动的中心快门

当航空摄影机的操纵系统给出快门释放的信号时，电磁铁 9 工作，将衔铁 10 吸开，使它脱离齿条 6 下部的凸起 11。于是弹簧 21 推动齿条 6 向右运动，经齿轮 5、大齿环 3 和叶片轴上的小齿轮 1 的传动，使五个叶片 2 一起顺时针旋转，先用工作边 A 打开物镜的通光孔，再用工作边 B 关闭光孔，完成一次曝光过程。因为叶片的打开工作边和关闭工作边不是同一个工作边，所以叶片呈双叶形。

齿条 6 向右移动完成一次曝光后，齿条下部的凸起 11 恰好移到衔铁 10 的右侧，这时电磁铁 9 已经断电，衔铁 10 在它轴上的复位弹簧的作用下弹出并从左面挡住齿条 6 使它不能返回，以避免由于弹簧的回弹而使快门叶片又一次打开。同时，齿条 6 的位移改变了开关 S_1 和 S_2

的工作状态，电机 12 重新被接通，但转向相反。于是，弹簧筒 20 向左移动，使右边的压簧被压缩上紧，一直到开关 S_3 和 S_4 被压块 8 压下，改变工作状态，使电机断电为止。

当航空摄影机的操纵系统又一次给出快门释放信号，使电磁铁 9 工作时，齿条 6 在右边压簧的推动下向左移动，带动叶片逆时针旋转，打开并关闭物镜的光孔，完成又一次的曝光过程。但是，在这次曝光中，叶片是用 B 边打开光孔，用 A 边关闭光孔的。

从这种快门的工作过程看，叶片在每一次曝光中是单向运动的，在相邻两次曝光中是往复运动的。

三、反复运动的中心快门

这种快门的叶片，打开物镜光孔时向一个方向旋转，关闭物镜光孔时则向相反方向旋转，叶片的打开工作边和关闭工作边是同一个工作边。因此，叶片常做成扇形，长度可比开闭同样通光孔径的单向运动叶片缩短近一半，这不仅减小了叶片本身的转动惯量，也减小了整个快门的外形尺寸。在快门的特性方面，反复运动的中心快门在光孔全部开启时，叶片必须先制动，然后再重新启动并反向运动关闭快门，而单向运动的中心快门，叶片在全开光孔时以较高的速度继续旋转，所以，对于同样大小的物镜通光孔径来说，单向运动的中心快门比反复运动的中心快门容易获得较短的曝光时间，但是在打开阶段时间和关闭阶段时间也相同的条件下，反复运动的中心快门全开时间比单向运动的中心快门长，因而通光效率较高。

图 5-7 是这类反复运动的中心快门在小型照相机中的典型结构图。如图所示，快门有 5 个叶片，叶片驱动机构、机械调速器（也称慢门机）和自拍机等全部快门机构都安装在镜头外筒和内筒（物镜筒）之间的环形空间内，结构复杂、精巧和紧凑，加上调速范围较宽，又有自拍延时、闪光连动等功能，在很长时期内是中高档照相机镜间中心快门的主要型式。

1. 叶片驱动机构　图 5-8 是这种快门的叶片驱动机构原理图。图 5-9(a)至(f)则表示快门在上紧和释放过程中，叶片是怎样反复运动开闭物镜光孔的。

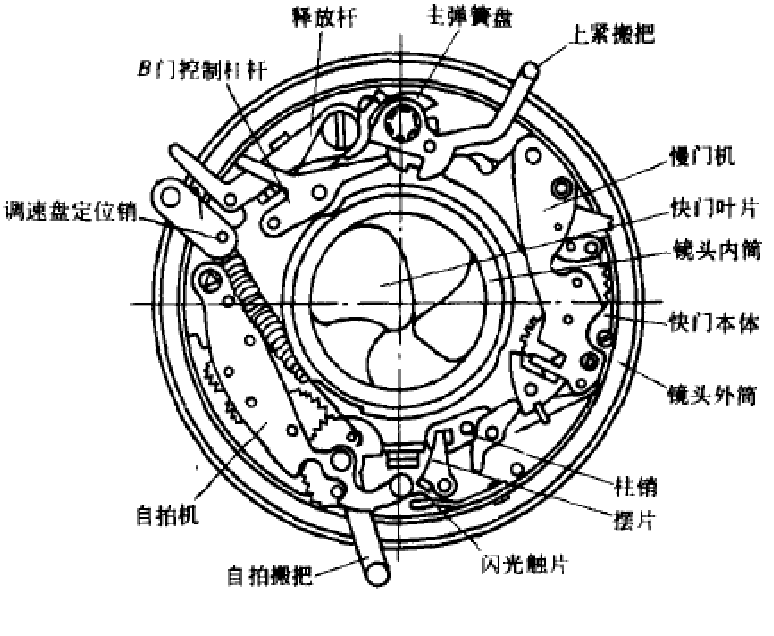


图 5-7　反复运动的中心快门

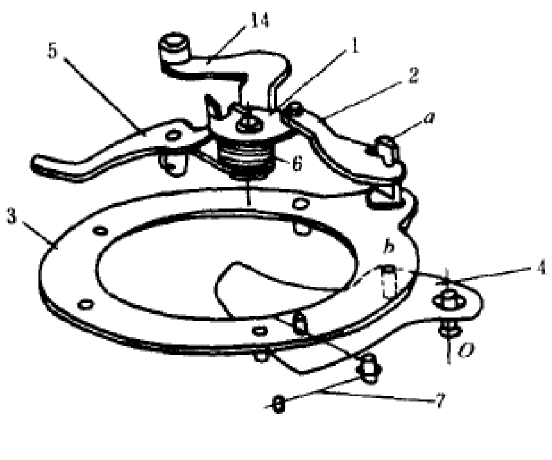
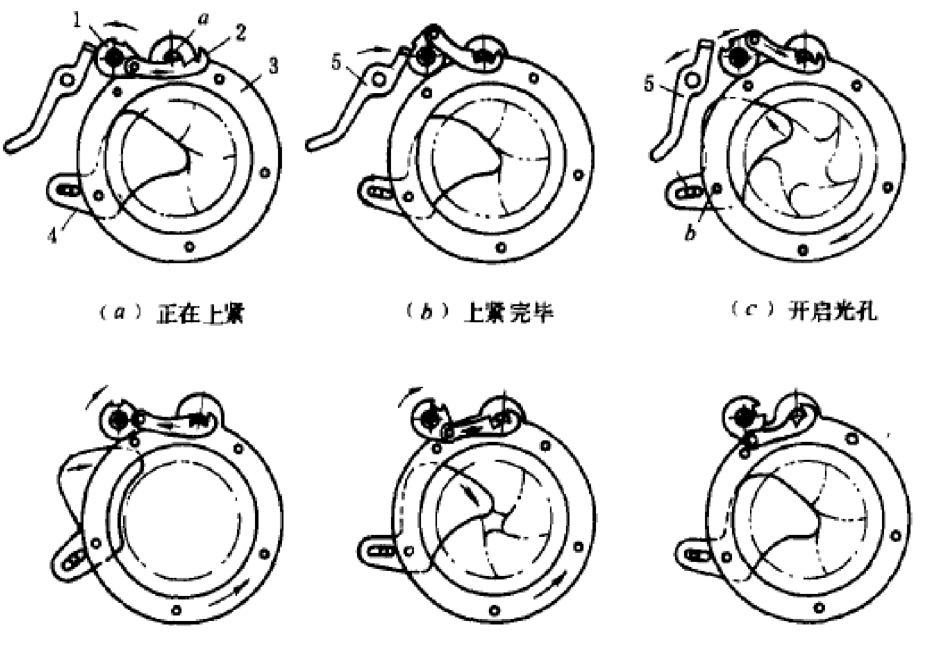


图 5-8　叶片驱动机构原理图

主弹簧（扭簧）6 是快门的动力源。上紧时，逆时针拨动上紧搬把 14 和与它固定在一起的主弹簧盘 1，直至缺口被释放杆 5 右端钩住，使主弹簧保持上紧状态。在快门上紧过程中，小钩 2 虽然被主弹簧盘推向右移，但是叶片圈 3 在小扭簧 7 的作用下保持不动，如图 5-9(a)所示，



（a）正在上紧　（b）上紧完毕　（c）开启光孔

（d）全部开启　（e）关闭光孔　（f）关闭完毕

图 5-9　快门开启和关闭过程

小钩右端的 M 形钩头与铆在叶片圈上的半圆柱销 a 脱离，所以小钩不会推动叶片圈和叶片打开光孔。快门上紧完毕时，如图中(b)所示，小钩重新与半圆柱销结合，为快门释放作好准备。

快门释放时，揿下释放杆左端，使它的右端解脱对主弹簧盘的锁定，主弹簧释放所储藏的能量。如图 5-9(c)所示，主弹簧盘顺时针旋转，推动小钩向右运动，小钩又推动叶片圈顺时针旋转。铆在叶片圈上的五个销钉 b 拨动 5 个叶片(图上只画出一个完整的叶片)绕各自的轴一起逆时针转动，从中心对称地打开光孔。

当物镜光孔被全部开启时[如图 5-9(d)所示]，主弹簧盘继续顺时针旋转，如图(e)所示，把小钩往左拉回，带动叶片圈反方向(逆时针)旋转，使 5 个叶片也一起反方向(顺时针)转动，关闭光孔。图 5-9(f)为光孔全部关闭，快门完成一次曝光过程的机构位置。

2. 曝光时间的装定和调节机构　调速板和慢门机是这种机械快门装定和调节曝光时间的机构。慢门机的结构如图 5-10 所示，它是利用齿轮系、擒纵轮(卡子轮)17 和擒纵爪(卡子)18 组成的无动力无固有频率的擒纵式阻尼器。在快门完全开启后，上紧搬把 14 的凸起 c 同慢门推板 15 的右端接触，并按箭头方向推动慢门机构开始工作。于是叶片驱动机构的运动速度受到慢门机的阻尼而减慢，快门全开时间延长，直至上紧搬把的凸起同慢门推板脱离接触后，叶片再迅速关闭。改变阻尼时间的长短就可以改变快门全开时间的长短，从而达到调节快门曝光时间的目的。如图 5-11 所示，这种只改变全开时间而不改变打开时间和关闭时间的调节方法，比调节动力弹簧的力矩，使打开时间和关闭时间也同时改变的方法，有较高的通光效率和工作可靠性。

曝光时间的装定靠调速板来进行。转动镜头筒上的曝光时间调节手轮，将指标对准不同的曝光时间刻度，就可以通过铆在调速板上的拨销 d(图 5-12)把调速板转到不同位置。调速板上开有 3 个曲线槽，曲线槽 Ⅰ 有 10 个等间隔凹槽 e，与快门壳体上的一个弹性销 10 配合，起定位作用。每一个定位槽与快门的一档曝光时间刻度相对应。快门的调速范围从 1s 到 1/300s 共 9 档，还有一档是 B 门。曲线槽 Ⅱ 有三段圆弧台阶，分别决定慢门机中销子 m 的三种不同的位置，把整个调速范围分成低速段 L、中速段 M 和高速段 H。曲线槽 Ⅲ 有 10 个高低不同的台阶，可以决定慢门机销子 n 的不同位置，在三个速度段内再细分档，即除最低的台阶为 B 门档外，低速档分为 1s、1/2s、1/4s 和 1/8s 四档，中速档分为 1/15s 和 1/30s 两档，高速档分为 1/60s、

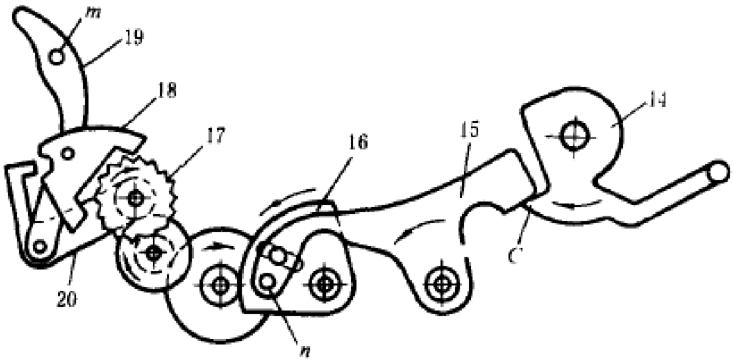


图 5-10　慢门机结构示意图

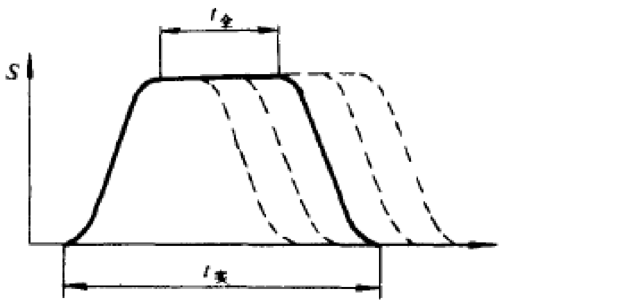


图 5-11　用改变全开时间的方法调节快门的曝光时间

1/125s 和 1/300s 三档。

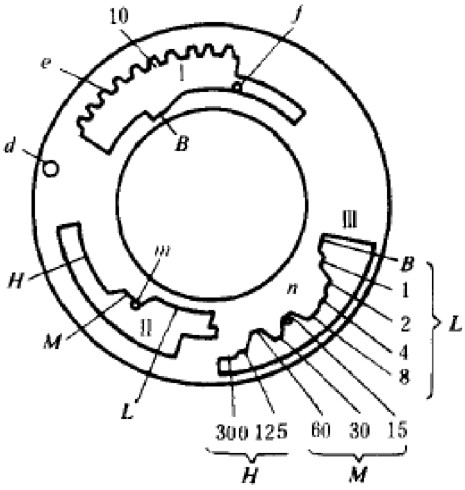


图 5-12　快门调速板

当慢门机的销子 m 处于调速板曲线槽Ⅱ的低速段台阶所决定的位置时，整个慢门机构全部工作，加在主弹簧盘上的阻尼力矩最大；当销子 m 登上中速段台阶时，卡子离合板 19(图 5-10)带着卡子 18 逆时针转动一个小角度，使卡子和卡子轮脱离啮合，减小了阻尼力矩；当销子 m 登上高速段台阶时，卡子离合板再逆时针转动一个角度，推动卡子轮离合板 20 也逆时针转动，使卡子轮与齿轮系脱离啮合，进一步减小阻尼力矩。每一个速度段中的细分档，则是通过调速板上曲线槽Ⅲ迫使销子 n 处于不同位置，也就是使慢门机的扇齿轮 16 和慢门推板 15 处于不同的起始位置，从而改变主弹簧盘推动慢门机工作的迟早和受慢门机阻尼时间的长短。快门的最短曝光时间 1/300s 是当销子 m 和 n 都处于调速板曲线槽的最高台阶上得到的。这时，不但卡子和卡子轮都与齿轮系脱离啮合，而且主弹簧盘在旋转中碰不到慢门推板，因此慢门机对叶片驱动机构不起阻尼作用。

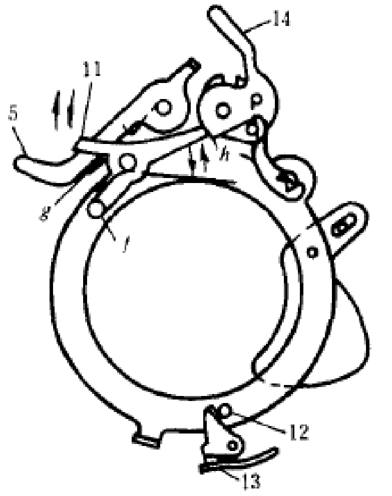


图 5-13　B 门机构

所谓 B 门，即手控曝光时间。当按下快门按钮后，快门即开启，手不离按钮，快门不会关闭，只有当手离开按钮，快门才会关闭。手按的持续时间就是胶片的曝光时间。当把快门曝光时间调节手轮对到刻度中的字母“B”时，调速盘上曲线槽Ⅰ中的 B 门控制槽(图 5-12)恰好对准 B 门控制杠杆 11(图 5-13)的销子 f。当撤下释放杆 5 时，B 门控制杠杆在其自身扭簧的作用下逆时针转过一个角度，销子 f 跌入 B 门控制槽，同时右端抬高，当快门全开时挡住上紧搬把 14 的肩部 h，阻止主弹簧盘继续旋转关闭快门。只有当手离开快门按钮，释放杆 5 的凸起 9 推动 B 门控制杠杆的左臂，使它顺时针转动，其右端离开主弹簧盘的肩部 h，主弹簧盘就能继续顺时针旋转，把快门关闭。当调速盘处于除 B 门以外的其它各档速度位置时，曲线槽Ⅰ都迫使 B 门控制杠杆处于不能阻挡主弹簧盘旋转的位置，曝光时间由慢门机或直接由叶片驱动机构控制。

3. 自拍机　自拍机的作用是，保证在快门释放按钮按下时，先由自拍机完成 8～12s 的延时，然后使快门释放，以便在这段时间内，摄影者本人能进入被摄的画面内。因此，自拍机在本

质上和慢门机是相同的，只是起的作用不同。在有的相机里还把自拍机作为慢门机的超低速档(2～8s)来使用。自拍机的结构原理如图 5-14 所示。它是一个有动力的无固有频率的擒纵式调节器。上紧时按顺时针方向拨动自拍上紧搬把 21，通过其上的齿带动齿轮 23 和单向机构的棘轮 24(此时棘爪在棘轮上打滑，齿轮 23 不会带动空套在它轮上的大齿轮和后面的齿轮转动)，与此同时动力弹簧 25 被拉紧。这时，如果没有锁定装置，则当松手放开上紧搬把 21 时，搬把会在弹簧 25 的拉力下反向转回原位，并通过单向机构带动整个自拍机的齿轮和擒纵机构运动。实际上，如图 5-15(a)所示，在推动释放杆 5

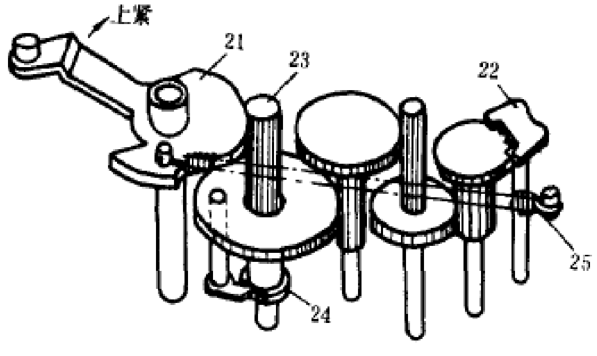
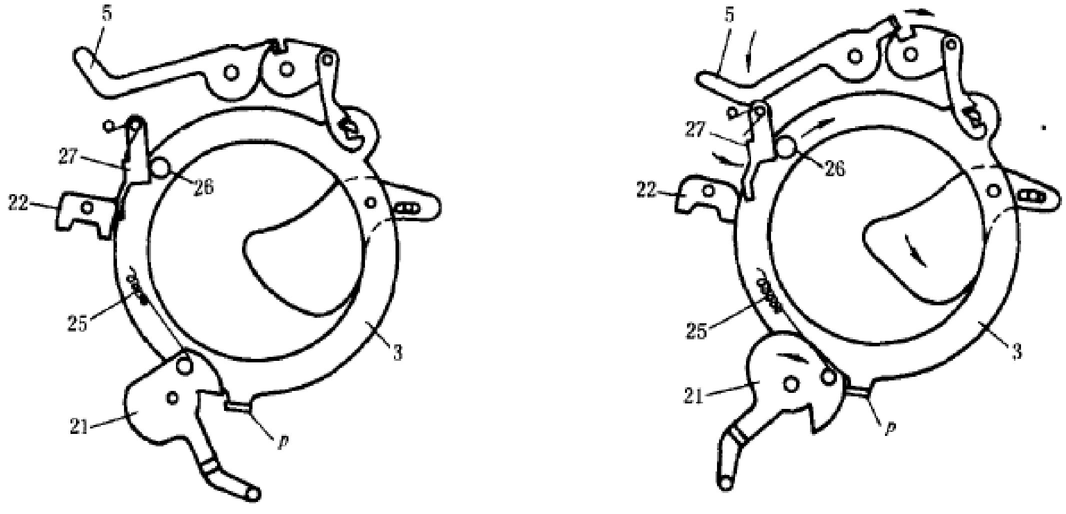


图 5-14　自拍机结构原理图



(a) 锁定　　(b) 释放

图 5-15　自拍机的锁定与释放

之前，叶片圈 3 上的柱销 26 使自拍刹车块 27 抵住自拍机中的擒纵爪 22，起到锁定自拍机的作用。因此，上紧自拍机后，不推动释放杆 5 释放快门，自拍机不会工作。如图 5-15(b)所示，当推动释放杆 5 时，叶片圈 3 刚转过一个小角度，还来不及使叶片打开光孔，其上的凸块 P 就被搬把 21 挡住而不能继续旋转。叶片圈转过的这个小角度足以使柱销离开自拍刹车块 27，自拍刹车块在复位扭簧的作用下不再抵住擒纵爪 22，自拍机开始工作。只有当弹簧 25 经过所需要的延迟时间把搬把 21 拉回到上紧前的位置时，如图 5-15(a)所示，叶片圈 3 才不受阻挡而能顺时针旋转，打开光孔。

4. X 闪光连动机构　所谓 X 闪光是指使用充氙气的电子闪光灯作为摄影的辅助光源。这种电子闪光灯也叫 X 型闪光灯，是目前普通摄影中广泛应用的脉冲光源。尤其是小型电子闪光灯，体积小，耗电少，不仅可以单独携带，迅速插装在照相机的闪光灯插座上使用；也可以直接装入机身，成为小型照相机里十分普及的内藏闪光灯。

因为 X 型闪光灯启动极快，从接通闪光灯触发电路到光强达到峰值仅需一百多微秒，闪光持续时间很短，一般为几十微秒至几毫秒，所以有一个与快门同步工作的问题。一般与中心快门连用时，是在快门开到最大通光面积的 80% 时，接通闪光灯的触发电路，使快门全开时，闪光灯的光强达到峰值。

大多数中心快门设有 X 闪光连动机构。如图 5-7 所示，固定在叶片圈上的柱销在叶片把光孔开到最大面积的 80%时，使摆片上的触点与固定在快门壳体上的闪光触片接触，也就是把闪光触发电路接通（图 5-13 中画出了闪光触点接通的状态），闪光灯工作。当叶片圈反向转动推动叶片去关闭光孔时，柱销退回原位，摆片也在其轴上扭簧作用下复位，触点断开（如图 5-7 中所示的原始位置）。

四、双层中心快门

普通的中心快门，特别是反复运动的中心快门，曝光时间不能缩得很短，这是因为叶片总是要有一个启动和制动的过程。因此，如用提高叶片转速来缩短曝光时间，不仅叶片运动速度受零件机械强度的限制，而且在制动时会产生剧烈的撞击现象，同时，强烈的撞击也会影响相片的质量。如用缩小叶片切口来缩短曝光时间，则会降低通光效率。普通中心快门的曝光时间一般不能少于 1/300～1/500s。

采用双层结构的中心快门（图 5-16），可以将曝光时间缩短到 1/1000s 左右。它实际上是两个单向运动的中心快门的组合。A、B 两层快门各有四个叶片，分别由各自的驱动机构控制其运动。快门上紧前，B 层快门叶片遮住物镜光孔，A 层快门处于打开状态。快门上紧时，上紧电机 M 经电磁离合器 L、锥齿轮 1、2 和两级齿轮减速后，带动齿轮 29 旋转。然后分两路继续传动，一路经齿轮 30 带动计数器 31 动作，累计快门曝光的次数，另一路经齿轮 4、轴 6，带动轴 7 及固定在轴上的凸轮 11 一同旋转。凸轮 11 首先拨动 A 快门上的杠杆 12，经连杆和扇形齿轮 14 带动空套在轴 18 上的齿轮 15 顺时针旋转。齿轮 15 上的挡块 16 拨动固定在轴 18 上的上紧凸轮 17 和控制凸轮 22 一同顺时针旋转，一方面上紧 A 层快门的动力弹簧（扭簧）20，另一方面推动连杆 24 和摇臂 26，并经过四根长连杆 27 拉动 A 层快门叶片关闭。这时凸轮 22 所处的位置允许扇齿轮 14 在扭簧 13 的作用下复位，同时控制凸轮 22 被释放杆 25 挡住而不能逆时针返回，动力弹簧保持上紧状态。A 层快门完成上紧过程。凸轮 11 在电机的带动下继续顺时针旋转，再拨动 B 层快门的杠杆 8，经过与 A 层快门结构相同的驱动机构，在上紧 B 层快门动力弹簧的同时，把 B 层快门叶片由关闭到打开，完成 B 层快门的上紧过程。

快门释放时，由控制电路来的曝光脉冲信号，使控制 A 层快门的电磁铁 35 线圈成通路，吸引衔铁 32，拨动释放杆 25 释放控制凸轮 22。控制凸轮 22 在动力弹簧 20 的推动下逆时针旋转，带动 A 层快门叶片打开物镜光孔。B 层快门的关闭则由另一个电磁铁控制。由控制电路改变使这两个电磁铁动作的脉冲信号的时间间隔就可以调节从 A 层快门开始打开光孔到 B 层快门开始关闭光孔的时间间隔 Δt。如图 5-17(a)所示，当快门的全开时间 $t_{全}>0$ 时，调节 Δt，也就是改变 $t_{全}$ 的长短。如图中(b)所示，当 $t_{全}$ 减小到 $t_{全}=0$ 时，再缩短 Δt，不仅快门没有全开阶段，而且快门的实际通光孔面积 S 将随 Δt 的减小而减小。因为，实际上当 A 层快门尚未把物镜光孔全部开启时，B 层快门就开始关闭光孔了。如图 5-17(b)中，$\Delta t_2<\Delta t_1$，实际曝光时间 $t_2<t_1$，同时通光面积 $S_2<S_1<S_{全}$。由于双层中心快门的两层快门分别由两个电磁铁控制，所以曝光时间可以由自动曝光控制电路在很宽的范围内调节，既可以获得很短的曝光时间，也可以得到很长的曝光时间。

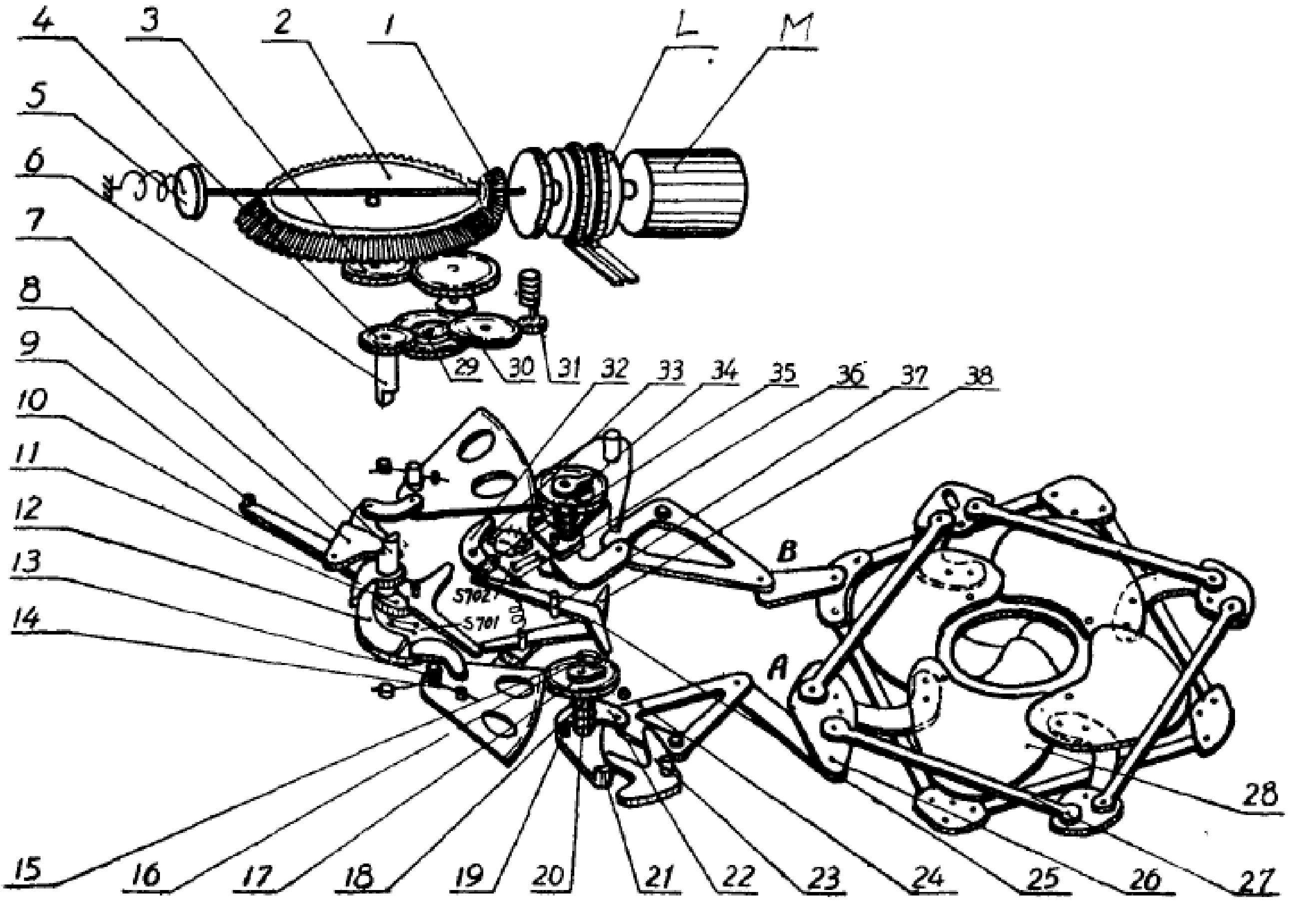
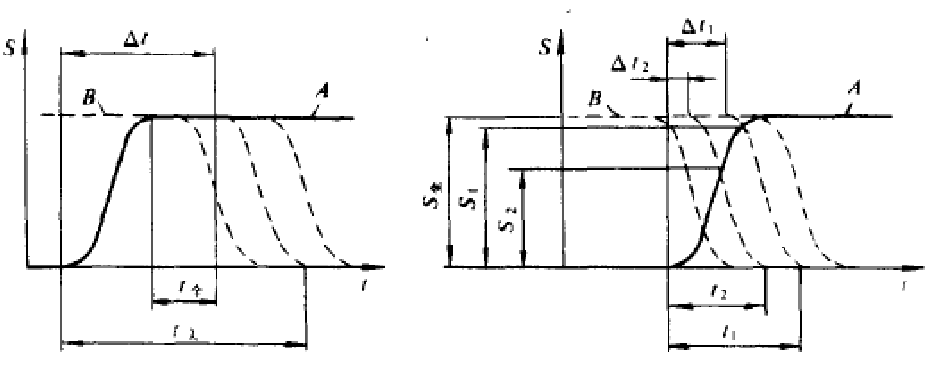


图 5-16　双层中心快门



（a）t全>0时　　　　（b）t全＝0时

图 5-17　双层中心快门曝光时间的调节

五、高速中心快门

双层中心快门虽然可以获得更短的曝光时间，但并没有解决叶片制动时的撞击对影像质量的影响问题。快门叶片的制动撞击引起的影像模糊尤其对于测量用的摄影仪器，如航空测量相机，会严重影响像点的测量精度。另一方面，为拍摄较大比例尺的航空像片，必须降低摄影高度，结果引起像移速度的增大。为了把像移引起的影像模糊量控制在测量精度和分辨率允许的范围内，必须尽量缩短快门的曝光时间。前面三种用弹簧储能作为动力源，驱动叶片间歇运动的中心快门都不能满足高精度大比例尺摄影测量的要求，所以它们一般在航空摄影机中只能用于侦察摄影。

目前在航空测量相机中采用的所谓高速中心快门，直接用电机驱动叶片作单向连续不断的高速旋转，这样就能使快门在无制动撞击的非常平稳的工作状态下，以很短的曝光时间开闭

较大的通光孔径。

图 5-18 表示一种航测相机的高速中心快门原理图。转速可调的电动机(图中未画出)通过齿轮 1、2 和四个小齿轮使快门的四个相同的圆盘形叶片 4 作连续不断的旋转。最大转速达 9000r/min,最短曝光时间达 1/1000s,通光效率达 80%。但是,这四个高速旋转的叶片的开口每秒钟可以打开物镜光孔 150 次,也就是相邻两次曝光的时间间隔约等于 6.7ms,显然大大超过了航空摄影所需要的拍摄频率。为此,由凸轮驱动的光闸 6 受操纵器给出的脉冲信号控制,按摄影所需要的时间间隔打开光孔。只要光闸 6 处于遮盖物镜光孔的位置,即使叶片 4 多次"打开"光孔,感光材料也不会曝光。

叶片 7 的转速只有叶片 4 的 1/10。增加这个慢速旋转的圆盘形叶片是为了从叶片 4 的每 10 次"打开"位置中,滤去 9 次,把可能打开的频率降低 10 倍。这样,光闸 6 的动作就可以从容得多。否则,在叶片 4 转速较高时,要求光闸 6 必须在几十毫秒,甚至几毫秒内完成往复运动,其结果仍然会产生剧烈的制动撞击。

这种快门的缺点是叶片的层次多,要求物镜光组之间的轴向间隔较大,同时光闸 6 和叶片 7 的尺寸较大。

图 5-19 是另一种高速中心快门的原理图。这种快门只有三个圆盘形叶片和一个三叶

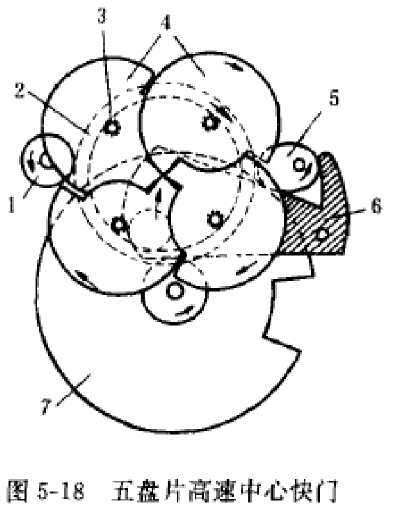


图 5-18　五盘片高速中心快门

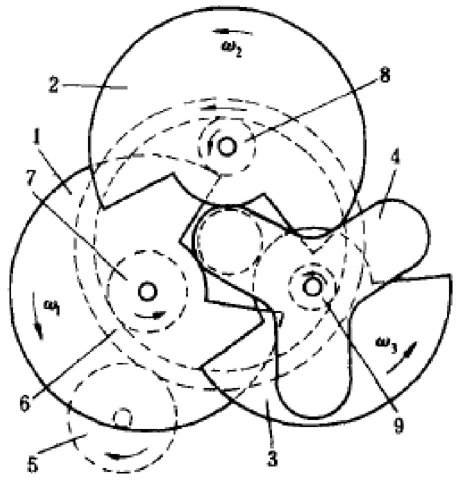


图 5-19　三盘片高速中心快门

形光闸,叶片的层次减少了,光闸的尺寸也减小了。电机通过齿轮 5 和齿环 6 驱动三个齿数不同的齿轮 7、8 和 9 旋转,从而使三个圆盘叶片 1、2 和 3 具有不同的转速,其比值为 4∶6∶7。三个叶片的最高转速分别为 ω_1=7000r/min、ω_1=10500r/min 和 ω_3=12250r/min,快门的最短曝光时间为 1/1000s。图 5-20 以同一时间座标表示这三个叶片的通光特性。由图可见,由于各个叶片"打开"光孔的频率不同,它们的通光脉冲具有不同的时间间隔,在时间座标上的位置互相错移。只有三个脉冲完全对齐时,光孔才可能打开。这样,三个叶片共同打开光孔的频率就比任何一个叶片低。这三个叶片共同打开光孔的周期 T_c 与各个叶片工作周期之比,恰等于这三个叶片转速之比的最小公倍数,即

$$T_c : T_1 : T_2 : T_3 = 84 : 4 : 6 : 7$$

三叶形光闸 4 受电磁铁的控制,在需要曝光时打开物镜光孔。

5-2.2　中心快门的特性

中心快门是用叶片的旋转运动来打开和关闭物镜光孔的,叶片的运动特性是决定中心快

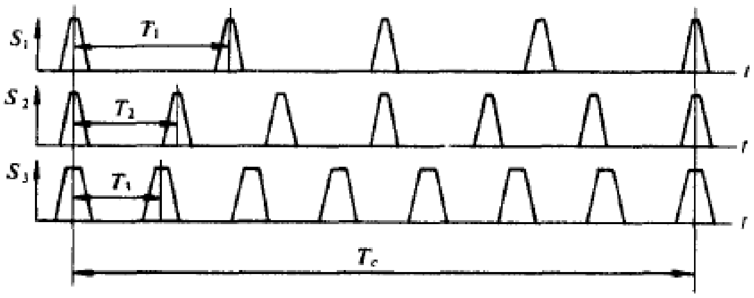


图 5-20 高速中心快门叶片的通光特性

门工作特性的重要因素。叶片作单向连续运动的中心快门，如高速中心快门，在稳定工作状态下，叶片以某一恒定的速度旋转，运动规律比较简单，我们着重分析叶片的几何参数对快门通光特性的影响。以弹簧为动力源的中心快门，包括单向运动的和反复运动的中心快门，叶片从启动到停止是作变速运动的，分析快门的通光特性必须考虑包括弹簧、传动机构和叶片在内的整个运动系统的特性。

一、叶片匀速转动的中心快门的特性

1. 实际曝光时间 $t_{实}$ 如图 5-21 所示，叶片以恒定的角速度 ω 旋转。假定工作边是直边，则快门打开阶段、全开阶段和关闭阶段的持续时间分别为

$$t_{开} = \frac{\alpha/2}{\omega} \tag{5-16}$$

$$t_{全} = \frac{\gamma - \alpha}{\omega} \tag{5-17}$$

$$t_{关} = \frac{\alpha/2}{\omega} \tag{5-18}$$

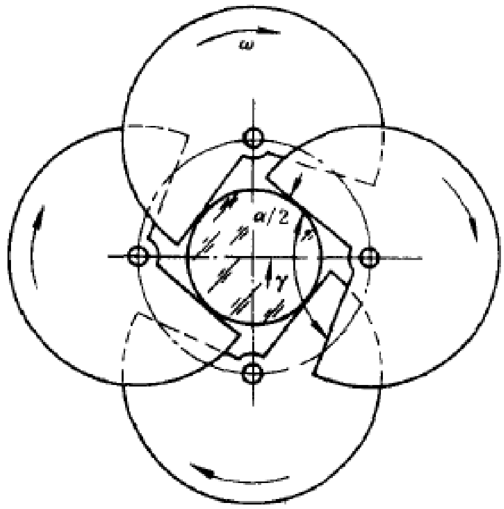


图 5-21 叶片匀速转动的中心快门

式中 α 为叶片转轴对物镜有效孔径的张角；γ 为叶片的切口角。

快门的实际曝光时间为

$$t_{实} = \frac{\alpha/2}{\omega} + \frac{\gamma - \alpha}{\omega} + \frac{\alpha/2}{\omega} = \frac{\gamma}{\omega} \tag{5-19}$$

由上式可以看出，这种叶片作单向匀速转动的中心快门的实际曝光时间只决定于叶片切口角和旋转角速度，与 α 角的大小无关。

2. 通光效率 η 因为叶片作匀速转动，所以只要叶片的打开工作边和关闭工作边形状相同，打开阶段的效率和关闭阶段的效率就完全相等，即 $\eta_{开} = \eta_{关}$，计算快门通光效率时可以把(5-16)式和(5-19)式代入(5-12)式得到

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{开})\frac{\alpha}{\gamma} \tag{5-20}$$

(5-20)式表明，这种中心快门的通光效率取决于打开阶段的通光效率 $\eta_{开}$ 和比值 α/γ，但与叶片的转速无关。

3. 有效曝光时间 $t_{效}$ 将(5-20)式和(5-19)式代入(5-14)式得

$$t_{效} = [\gamma - (1 - \eta_{开})\alpha]/\omega \tag{5-21}$$

由(5-16)式至(5-21)式可见，叶片作匀速转动的中心快门的特性有以下特点：

(1)实际曝光时间与有效曝光时间都与叶片的转速成反比，改变叶片的转速就可以调节快

门的曝光时间，但不会影响快门的通光效率。因为单向连续旋转的叶片没有启动和制动的过载和撞击，所以可以用提高叶片转速的方法获得很短的曝光时间。但是，当叶片的转速很高时，叶片的不平衡性、轴承中的间隙和歪斜、空气的扰动和陀螺效应等引起的叶片轴向和径向振动，会影响叶片旋转的平稳性，增加机构的磨损，缩短快门的使用寿命，甚至造成机械损坏。因此，叶片必须进行动平衡处理，并选用高精度轴承。

(2)α 角的大小随物镜有效光阑孔径的改变而改变。因此，调节物镜的光圈会改变通光效率和有效曝光时间，但不会改变实际曝光时间。增大 F 数，也就是缩小可变光阑的孔径，快门的通光效率提高，有效曝光时间增长(图 5-22)。

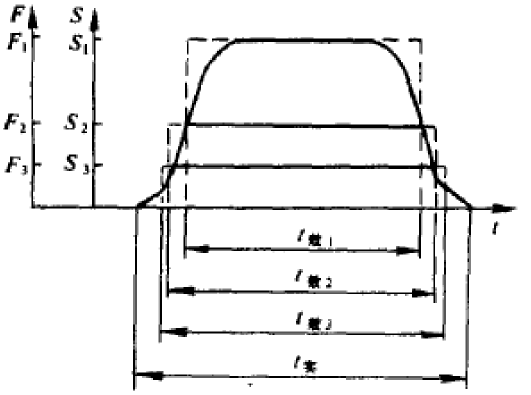


图 5-22　调节光圈对中心快门通光特性的影响

(3)减小切口角 γ 可以缩短曝光时间，但最小切口角受到 α 角的限制。如果 $\gamma_{min}<\alpha$，物镜的有效光孔不能被全部开启。增大切口角可以提高快门的通光效率，但最大切口角 γ_{max} 受到关闭光孔所需要的叶片最小遮挡面积和叶片间的防漏光保险重叠面积的限制，同时还必须考虑动平衡的可能性和叶片的刚度。

(4)这种单向连续旋转的快门，全开时间不可能很长，因此打开阶段的通光效率 $\eta_{开}$ 对快门的通光效率的影响较大。

为了分析 $\eta_{开}$ 与快门通光面积之间的关系，将(5-7)式改写为

$$\eta_{开}=\int_{t_{开}}S(t)\mathrm{d}t/S_F t_{开} \tag{5-22}$$

式中 $S(t)$ 为快门工作过程中的某一时刻的通光面积，S_F 为物镜光圈调至某一档光圈数(F 数)时的可变光阑通光面积，因为快门全开时，物镜的通光孔径实际上是由可变光阑的孔径来限制的。对于匀速转动的叶片来说，叶片的转角 φ 与时间成正比，即 $t=\varphi/\omega$，于是

$$\int_{t_{开}}S(t)\mathrm{d}t=\int_{\varphi_{开}}S(\frac{\varphi}{\omega})\mathrm{d}(\frac{\varphi}{\omega})=\frac{1}{\omega}\int_{\varphi_{开}}S_\varphi(\varphi)\mathrm{d}\varphi \tag{5-23}$$

式中 $\varphi_{开}$ 为快门打开阶段叶片的转角。

将 $t_{开}=\varphi_{开}/\omega$ 和(5-23)式代入(5-22)式可得打开阶段的效率

$$\eta_{开}=\int_{\varphi_{开}}S_\varphi(\varphi)\mathrm{d}\varphi/S_F\varphi_{开} \tag{5-24}$$

式中 $S_\varphi(\varphi)$ 是叶片给定角位置的光孔开启面积，它决定于叶片工作边的形状、叶片的数目和叶片的安装位置等结构参数。在(5-24)式中，除了 $S_\varphi(\varphi)$ 外，其它常数和参量 $S_{开}$、$d_{效}$ 也都是几何参数。因此，这种叶片作匀速转动的中心快门的打开阶段效率只与叶片和机构的几何参数有关，与机构的运动特性无关。

值得指出的是，(5-24)式中分母含有因子 S_F，但不能因此得出结论说 $\eta_{开}$ 与 S_F 成反比。因为，如图 5-22 所示，当 S_F 改变时，$t_{开}$ 或 $\varphi_{开}$ 也随之改变，定积分 $\int_{\varphi_{开}}S_\varphi(\varphi)\mathrm{d}\varphi$ 的值(也就是打开阶段特性曲线下的面积)也就随之改变，且随 S_F 的增大而增大，随 S_F 的减小而减小。实际上 $\eta_{开}$ 随 S_F 的变化大小取决于打开阶段特性曲线的形状。假如打开阶段的特性曲线是一条直线，则 $\eta_{开}=0.5$，且不随 S_F 的改变而改变。表 5-1 列出了直线工作边叶片的 $\eta_{开}$ 在叶片数目 $N=2$

～10 和叶片转轴到光轴的距离 R 与光孔半径 r_0 之比 $R/r_0=1.1$～5 范围内的计算数值；表 5-2 列出了折线工作边叶片（如图 5-23 所示）的 $\eta_{开}$ 在 $N=2$～10，也就是折线的夹角 $\varphi=180°$～$36°$范围内的计算数值；表 5-3 列出了圆弧工作边叶片（如图 5-6 所示）的 $\eta_{开}$ 在 $N=2$～6，$R/r_0=1.1$～7 和工作边圆弧半径 ρ 与光孔半径 r_0 的比值 $\rho/r_0=2$～12 的范围内的计算数值。图 5-24 是根据表 5-1、5-2 和 5-3 中的部分数据绘制的直线工作边叶片（a）、折射工作边叶片（b）和圆弧工作边叶片（c）的 $\eta_{开}$ 随叶片数目 N 变化的曲线。

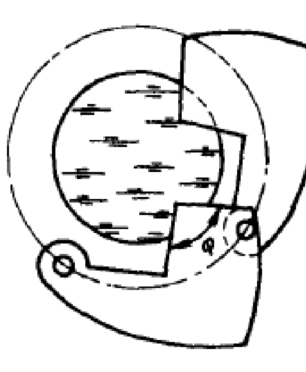


图 5-23　折线工作边叶片

表 5-1

R/r_0 \ N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.1	0.637	0.534	0.477	0.453	0.439	0.430	0.424	0.420	0.417
1.5	0.599	0.477	0.428	0.404	0.391	0.383	0.377	0.373	0.371
3	0.581	0.455	0.406	0.332	0.369	0.361	0.356	0.352	0.350
5	0.577	0.451	0.402	0.378	0.365	0.357	0.352	0.348	0.346

表 5-2

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ	180°	120°	90°	72°	60°	51.4°	45°	40°	36°
η 开折	0.576	0.632	0.648	0.655	0.659	0.661	0.662	0.663	0.664

表 5-3

	$\rho/r_0=2$					$\rho/r_0=4$				
	$N=2$	3	4	5	6	$N=2$	3	4	5	6
$R/r_0=1.1$	0.753	0.699	0.710	0.744	0.788	0.692	0.607	0.587	0.591	0.605
1.5	0.727	0.688	0.683	0.723	0.773	0.660	0.568	0.549	0.555	0.572
3	0.713	0.653	0.671	0.713	0.767	0.643	0.549	0.531	0.539	0.558
5	0.711	0.651	0.669	0.712	0.766	0.641	0.546	0.528	0.537	0.555
7	0.710	0.650	0.668	0.711	0.765	0.640	0.545	0.528	0.536	0.554
	$\rho/r_0=8$					$\rho/r_0=12$				
	$N=2$	3	4	5	6	$N=2$	3	4	5	6
$R/r_0=1.1$	0.664	0.565	0.531	0.521	0.521	0.655	0.551	0.513	0.498	0.493
1.5	0.629	0.522	0.488	0.479	0.480	0.619	0.507	0.468	0.454	0.450
3	0.612	0.501	0.468	0.460	0.462	0.601	0.486	0.447	0.437	0.431
5	0.609	0.498	0.464	0.456	0.459	0.598	0.482	0.443	0.430	0.428
7	0.608	0.497	0.463	0.456	0.458	0.597	0.481	0.442	0.429	0.427

由表中的数据和图中的曲线可以看出，当叶片数目由 2 片增加到 4 片时，各种形状工作边叶片的 $\eta_{开}$ 都有较显著的变化：直线工作边叶片和圆弧工作边叶片的 $\eta_{开}$ 随 N 的增加而下降，而折射工作边叶片的 $\eta_{开}$ 略有上升；当叶片数目 $N>4$ 以后，除 $\rho/r_0=2$ 的圆弧工作边叶片的 $\eta_{开}$ 随 N 的增加略有上升外，其它各种工作边叶片的 $\eta_{开}$ 都变化很小或几乎不再变化了，尤其是叶片的数目超过 5 片之后，$\eta_{开}$ 并没有显著的提高，快门的结构反而过于复杂。

由图 5-24（c）和表 5-3 可见，圆弧工作边叶片的 ρ/r_0 对 $\eta_{开}$ 的影响颇大，ρ/r_0 越小，$\eta_{开}$ 越高。以 $N=5$ 为例，$\rho/r_0=2$ 的 $\eta_{开}$ 约等于 $\rho/r_0=8$ 的 $\eta_{开}$ 的 1.5 倍。若比较 $N=4$ 和 $N=5$ 的直

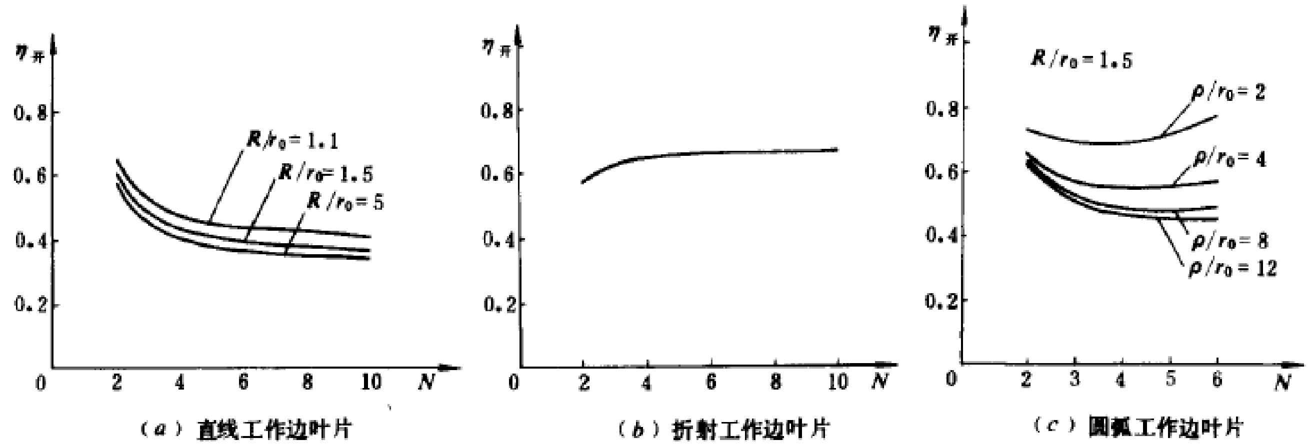


图 5-24　打开阶段效率 $\eta_{开}$ 随叶片数目 N 变化的曲线

线工作边叶片、折线工作边叶片和圆弧工作边叶片的 $\eta_{开}$，则 $\rho/r_0=2$ 的圆弧工作边的 $\eta_{开}$ 显然比直线工作边和折线工作边叶片的 $\eta_{开}$ 高。因此，叶片工作边的形状对 $\eta_{开}$ 的影响还是比较显著的。此外，如表 5-1、5-3 和图 5-24(a)所示，叶片的安装位置对 $\eta_{开}$ 的大小也有一定的影响，当 R/r_0 减小时，$\eta_{开}$ 略有提高。

总的来说，优选叶片的几何参数，例如采用 ρ/r_0 较小的圆弧工作边，R/r_0 较小的叶片安装位置，叶片的数目取 2 片或 5 片，可以把打开阶段的通光效率 $\eta_{开}$ 提高到 0.7 以上。若在合理的范围内增大叶片的切口角 γ，使比值 α/γ 减小到 0.3 左右，则这种叶片作单向匀速转动的中心快门的总通光效率 η 可以达到 0.9 以上。

二、叶片变速转动的中心快门的特性

以弹簧为动力源的中心快门，不论是单向运动的还是反复运动的，叶片在打开和关闭物镜光孔过程中的旋转角速度都有很大的变化，其变化规律取决于包括叶片和叶片驱动系统在内的整个运动系统的运动特性和弹簧的机械特性。对这种快门机构的动力学分析是确定快门通光特性的基础。

1. 快门机构的动能方程式　快门上紧时动力弹簧储存能量，快门释放时动力弹簧把势能转变为机构运动的动能。根据动能定理可写出

$$E=\eta_{机}A \tag{5-25}$$

式中 E 为快门机构运动系统的动能，A 为弹簧释放时推动快门机构运动所做的功，$\eta_{机}$ 为考虑到机构的摩擦等阻力的能量损失的机械效率，它总是小于 1。

若已知弹簧的机械特性，即弹簧力 P 与线变形量 f 或力矩 M 与角变形量 θ 之间的关系 $P(f)$ 或 $M(\theta)$，则弹簧所做的功可用下式计算

$$A=\int_{f_0}^{f}P(f)\mathrm{d}f=A(f) \tag{5-26}$$

或

$$A=\int_{\theta_0}^{\theta}M(\theta)\mathrm{d}\theta=A(\theta) \tag{5-27}$$

积分下限 f_0 和 θ_0 是弹簧开始释放时，被弹簧直接推动的运动构件的起始位置，例如图 5-6 中的弹簧筒 20 的起始位置，或图 5-8 中的主弹簧盘 1 的起始角位置；积分上限 f 和 θ 可以是弹簧释放完毕时该构件运动的末位置，也可以是运动过程中的某一个中间位置，这时 A 就是这个中间位置 f 或 θ 的函数 $A(f)$ 或 $A(\theta)$。

整个运动系统的动能 E 等于各个运动构件的动能之和，即

$$E = \sum E_l + \sum E_r \tag{5-28}$$

式中 E_l 是直线移动构件的动能，E_r 是转动构件的动能。既移动又转动的平面运动构件，如图 5-8 中的叶片 4 的动能是该构件质心的移动动能与它绕质心转动的动能之和。我们可以把它的移动动能加到 $\sum E_l$ 中去，把转动动能加到 $\sum E_r$ 中去。

各个运动构件的动能与它们的质量 m 或转动惯量 J，以及移动速度 v 或转动角速度 ω 有关，(5-28)式可进一步写成

$$E = \frac{1}{2}\sum m_i v_i^2 + \frac{1}{2}\sum J_j \omega_j^2 \tag{5-29}$$

为了求取叶片的运动特性，我们把上式作如下数学处理

$$E = \frac{1}{2}\omega_b^2\left(\sum m_i \frac{v_i^2}{\omega_b^2} + \sum J_j \frac{\omega_j^2}{\omega_b^2}\right) \tag{5-30}$$

式中 ω_b 表示快门叶片的转动角速度。令

$$J_{归} = \sum m_i \frac{v_i^2}{\omega_b^2} + \sum J_j \frac{\omega_j^2}{\omega_b^2} \tag{5-31}$$

$J_{归}$ 叫做快门机构的归化转动惯量，它是把快门机构中所有运动构件的质量和转动惯量按各个构件与叶片之间的速比折算到归化轴上去的结果。归化轴可以任意选择，这里选取叶片的转轴作为归化轴是为了分析叶片的运动特性。经过这样的数学处理，整个机构的动能可以简写成

$$E = \frac{1}{2}J_{归}\,\omega_b^2 \tag{5-32}$$

一般来说，(5-31)式中的速比 v_i/ω_b 和 ω_j/ω_b 不是常量，而是机构位置的函数，因此，归化转动惯量 $J_{归}$ 也是机构位置的函数，同时，弹簧所做的功 A 也随机构位置而变化。这里我们把 $J_{归}$ 和 A 都表示为叶片的角位置 φ 的函数 $J_{归}(\varphi)$ 和 $A(\varphi)$。又有

$$\omega_b = \frac{d\varphi}{dt} \tag{5-33}$$

合并(5-25)式，(5-32)式和(5-33)式可得快门机构的动能方程式

$$\frac{1}{2}J_{归}(\varphi)\omega_b^2 = \eta_{机}\,A(\varphi) \tag{5-34}$$

或写成

$$\frac{1}{2}J_{归}(\varphi)\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 = \eta_{机}\,A(\varphi) \tag{5-35}$$

2. 实际曝光时间 $t_{实}$ 为了求得快门各个工作阶段的持续时间和实际曝光时间，把(5-35)式再改写为

$$dt = t_\varphi(\varphi)d\varphi \tag{5-36}$$

式中

$$t_\varphi = \sqrt{\frac{J_{归}(\varphi)}{2\eta_{机}\,A(\varphi)}} \tag{5-37}$$

设 $\varphi_{开}$、$\varphi_{全}$、$\varphi_{关}$ 和 $\varphi_{实}$ 分别是对应于 $t_{开}$、$t_{全}$、$t_{关}$ 和 $t_{实}$ 的叶片转角(见图 5-25)，取(5-36)式的定积分可得

$$t_{开} = \int_{t_{开}} dt = \int_{\varphi_{开}} t_\varphi(\varphi)d\varphi \tag{5-38}$$

$$t_{关} = \int_{t_{关}} dt = \int_{\varphi_{关}} t_\varphi(\varphi)d\varphi \tag{5-39}$$

对于单向运动的中心快门来说，叶片在把光孔全部开启后仍继续旋转，因此全开阶段的持续时间为

$$t_{全(单向)} = \int_{t_{全}} \mathrm{d}t = \int_{\varphi_{全}} t_s(\varphi)\mathrm{d}\varphi \quad (5\text{-}40)$$

于是单向运动的中心快门的实际曝光时间

$$t_{实(单向)} = t_{开} + t_{全} + t_{关} = \int_{t_{实}} t_s(\varphi)\mathrm{d}\varphi \quad (5\text{-}41)$$

当快门机构的结构和动力弹簧的特性确定后，$t_s(\varphi)$就可以知道，$t_{开}$、$t_{全}$、$t_{关}$ 和 $t_{实}$ 均可求得。

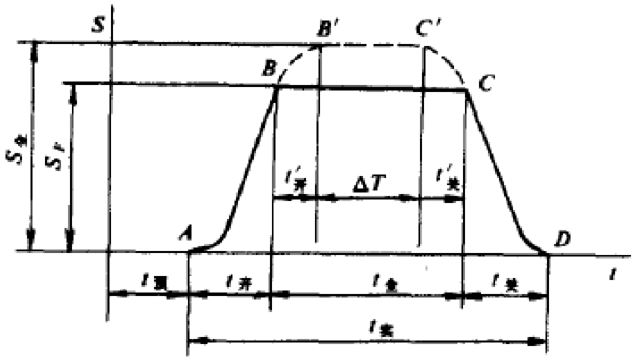


图 5-25 中心快门的通光特性

对于反复运动的中心快门来说，叶片在全开光孔后要先制动，然后再启动并反向转动去关闭光孔，因此全开阶段的持续时间应包括三部分，即

$$t_{全(反复)} = t'_{全} + \Delta T + t'_{关} = \int_{\varphi'_{开}} t_s(\varphi)\mathrm{d}\varphi + \Delta T + \int_{\varphi'_{关}} t_s(\varphi)\mathrm{d}\varphi \qquad (5\text{-}42)$$

式中 $t'_{开}$是从叶片把可变光阑所决定的通光孔面积 S_F（见图 5-25）全部打开到叶片停止运动的时间，$t'_{关}$是从叶片开始反向转动到开始关闭光阑孔的时间，$\varphi'_{开}$和 $\varphi'_{关}$是相应的叶片转角。

由(5-42)式可见，快门叶片停止转动的持续时间 ΔT 是与快门机构的运动特性无关的量，它仅取决于机械调速器（慢门机）或延时电路所设定的延迟时间。

于是反复运动的中心快门的实际曝光时间

$$\begin{aligned} t_{实(反复)} &= t_{开} + t'_{开} + \Delta T + t'_{关} + t_{关} \\ &= \int_{\varphi_{开}+\varphi'_{开}} t_s(\varphi)\mathrm{d}\varphi + \Delta T + \int_{\varphi'_{关}+\varphi_{关}} t_s(\varphi)\mathrm{d}\varphi \end{aligned} \qquad (5\text{-}43)$$

3. 通光效率 η 和有效曝光时间 $t_{效}$ 一般来说，叶片变速运动的中心快门的打开阶段和关闭阶段的特性曲线不相同，它们的效率也不同，即 $\eta_{开} \neq \eta_{关}$，所以，快门的通光效率 η 要用(5-11)式来计算。

根据(5-7)式和(5-9)式以及定积分的性质，打开阶段和关闭阶段的效率分别为

$$\eta_{开} = \frac{\int_{t_{开}} S(t)\mathrm{d}t}{S_F t_{开}} = \frac{\int_{\varphi_{开}} S_\varphi(\varphi) t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi}{S_F \int_{\varphi_{开}} t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi} \qquad (5\text{-}44)$$

$$\eta_{关} = \frac{\int_{t_{关}} S(t)\mathrm{d}t}{S_F t_{关}} = \frac{\int_{\varphi_{关}} S_\varphi(\varphi) t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi}{S_F \int_{\varphi_{关}} t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi} \qquad (5\text{-}45)$$

式中 $S_\varphi(\varphi)$是快门的通光面积，它是叶片角位置 φ 的函数，仅与叶片开启和关闭光孔的几何参数有关；$t_S(\varphi)$是由(5-37)式表达的函数对 φ 的导数，它也是叶片角位置 φ 的函数，但是取决于快门机构动能方程式(5-35)所决定的运动特性。因此，这种叶片作变速运动的中心快门与叶片作匀速转动的中心快门不同，它的打开阶段和关闭阶段的通光效率不仅和叶片开闭光孔的几何特性有关，而且和快门机构的运动特性有关。

根据(5-10)式和(5-14)式可知，快门的有效曝光时间

$$t_{效} = t_{开}\eta_{开} + t_{全} + t_{关}\eta_{关}$$

将(5-38)式至(5-45)式中的$t_{开}$、$t_{全}$、$t_{关}$和$\eta_{开}$、$\eta_{关}$代入上式，可得单向运动的中心快门的有效曝光时间

$$t_{效(单向)}=\frac{1}{S_F}\left[\int_{\varphi_{开}}S_\varphi(\varphi)t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi+\int_{\varphi_{关}}S_\varphi(\varphi)t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi\right]+\int_{\varphi_{全}}S_\varphi(\varphi)t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi \tag{5-46}$$

和反复运动的中心快门的有效曝光时间

$$t_{效(反复)}=\frac{1}{S_F}\left[\int_{\varphi_{开}}S_\varphi(\varphi)t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi+\int_{\varphi_{关}}S_\varphi(\varphi)t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi\right]+\int_{\varphi'_{开}}t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi+\Delta T+\int_{\varphi'_{关}}t_S(\varphi)\mathrm{d}\varphi \tag{5-47}$$

这两种快门的通光效率η由$t_{效}/t_{实}$不难求得。

比较(5-46)式和(5-47)式可以看出，单向运动的中心快门与反复运动的中心快门在有效曝光时间或快门的通光效率方面的主要区别在于全开时间的长短。反复运动的中心快门在光孔全开后，叶片要停止运动，然后再反向运动。如果用慢门机或延时电路增加叶片停转的时间ΔT，则全开时间$t_{全}$更长。所以，反复运动的中心快门的通光效率比单向运动的中心快门要高，而且在$t_{实}$不变的条件下，$t_{效}$和η随$t_{全}$的增长而增加。$t_{全}$愈长，$\eta_{开}$和$\eta_{关}$对快门总的通光效率η的影响愈小。

5-2.3 中心快门动力弹簧的计算方法

以弹簧为动力源的中心快门，在运动机构的结构参数确定后，要根据最短曝光时间的要求，计算出动力弹簧的最大推动力或力矩，作为设计弹簧结构参数的依据。5-2.2中对快门机构的动力学分析，不仅是确定快门特性的基础，也是计算动力弹簧的基础。

在运用快门机构的动能方程计算动力弹簧时，应当把快门机构中所有运动构件的质量和转动惯量都折算到弹簧直接推动的移动构件或转动轴上去，并且从最短曝光时间的要求出发。因此在计算反复运动的中心快门的实际曝光时间时，要令(5-43)式中的$\Delta T=0$，也就是不用慢门机或延时电路延时。在这样的条件下，反复运动的中心快门和单向运动的中心快门的实际曝光时间都可以用(5-41)式计算，只是被积函数的具体内容不同而已。

对于拉簧或压簧，(5-41)式应改写为

$$t_{实}=\int_{f_{实}}t_s(f)\mathrm{d}f=\int_{f_{实}}\sqrt{\frac{m_{归}(f)}{2\eta_{机}A(f)}}\mathrm{d}f \tag{5-48}$$

式中f为拉簧或压簧释放时的线位移，$f_{实}$为对应于$t_{实}$的线位移量，以及

$$m_{归}(f)=\sum m_i\frac{v_i^2}{v_f^2}+\sum J_j\frac{w_j^2}{v_f^2} \tag{5-49}$$

$$v_f=\mathrm{d}f/\mathrm{d}t \tag{5-50}$$

对于扭簧，(5-41)式则应写为

$$t_{实}=\int_{\theta_{实}}t_s(\theta)\mathrm{d}\theta=\int_{\theta_{实}}\sqrt{\frac{J_{归}(\theta)}{2\eta_{机}A(\theta)}}\mathrm{d}\theta \tag{5-51}$$

式中θ为扭簧释放时的角位移，$\theta_{实}$为对应于$t_{实}$的角位移量，以及

$$J_{归}(\theta) = \sum m_i \frac{v_i^2}{\omega_\theta^2} + \sum J_j \frac{\omega_j^2}{\omega_\theta^2} \tag{5-52}$$

$$\omega_\theta = \mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t \tag{5-53}$$

快门的动力弹簧一般工作在机械特性的直线部分，故拉簧或压簧的力与线位移之间的关系 $P(f)$ 和扭簧的力矩与角位移之间的关系 $M(\theta)$ 都可以按图 5-26 所示的直线关系写成如下的直线方程

$$P(f) = \frac{P_{\max}}{f_{\max}}(f_{\max} - f) \tag{5-54}$$

$$M(\theta) = \frac{M_{\max}}{\theta_{\max}}(\theta_{\max} - \theta) \tag{5-55}$$

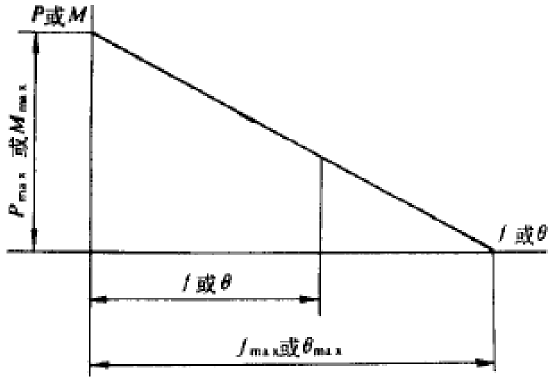


图 5-26 动力弹簧的机械特性

将 $P(f)$ 和 $M(\theta)$ 分别代入(5-26)式和(5-27)式可得动力弹簧释放时所做的功（设 $f_0=0,\theta_0=0$）

$$A(f) = \frac{P_{\max}}{2f_{\max}}(2f_{\max} - f)f \tag{5-56}$$

$$A(\theta) = \frac{M_{\max}}{2\theta_{\max}}(2\theta_{\max} - \theta)\theta \tag{5-57}$$

将 $A(f)$ 代入(5-48)式可得

$$t_{实} = \sqrt{\frac{f_{\max}}{\eta_{机} P_{\max}}} \int_{f_{实}} \sqrt{\frac{m_{归}(f)}{(2f_{\max} - f)f}}\mathrm{d}f \tag{5-58}$$

将 $A(\theta)$ 代入(5-51)式可得

$$t_{实} = \sqrt{\frac{\theta_{\max}}{\eta_{机} M_{\max}}} \int_{\theta_{实}} \sqrt{\frac{J_{归}(\theta)}{(2\theta_{\max} - \theta)\theta}}\mathrm{d}\theta \tag{5-59}$$

为获得最短曝光时间 $t_{实\min}$，拉簧或压簧的最大力为

$$P_{\max} = \frac{f_{\max}}{\eta_{机} t_{实\min}^2}\left[\int_{f_{实}} \sqrt{\frac{m_{归}(f)}{(2f_{\max} - f)f}}\mathrm{d}f\right]^2 \tag{5-60}$$

扭簧的最大力矩为

$$M_{\max} = \frac{\theta_{\max}}{\eta_{机} t_{实\min}^2}\left[\int_{\theta_{实}} \sqrt{\frac{J_{归}(\theta)}{(2\theta_{\max} - \theta)\theta}}\mathrm{d}\theta\right]^2 \tag{5-61}$$

一般来说，$m_{归}(f)$ 或 $J_{归}(\theta)$ 是机构位置的函数，因此上面两式中的定积分要用数值积分的方法计算。设用等步长 Δf 和 $\Delta\theta$ 分别代替积分变量 $\mathrm{d}f$ 和 $\mathrm{d}\theta$，则两式可改写为

$$P_{\max} = \frac{f_{\max}}{\eta_{机} t_{实\min}^2}\Delta f^2\left(\sum \sqrt{\frac{m_{归}(f)}{(2f_{\max} - f)f}}\right)^2 \tag{5-62}$$

$$M_{\max} = \frac{\theta_{\max}}{\eta_{机} t_{实\min}^2}\Delta\theta^2\left(\sum \sqrt{\frac{J_{归}(\theta)}{(2\theta_{\max} - \theta)\theta}}\right)^2 \tag{5-63}$$

方括号内的 f 或 θ 由快门开始打开时的位置计算起，逐个地增加步长 Δf 或 $\Delta\theta$，一直计算到快门完全关闭时的位置为止。

根据以上公式计算出动力弹簧的最大工作力或力矩后，就可以设计弹簧的结构参数。在选定弹簧材料和确定弹簧结构参数后，一般要再反过来验算最短曝光时间是否能满足要求，并且还要用实际绕制的弹簧和所设计中心快门的样机进行实验。由于快门的机械效率 $\eta_{机}$ 很难准确计算和测量，所以一般先给定一个初值，通过计算和试验再修正。同时，实际弹簧的参数一定要有足够的安全系数，以保证多次重复工作的寿命。

现在我们来举两个计算中心快门动力弹簧的实际例子。第一个例子中的归化质量是常量，第二个例子中的归化转动惯量是变量。

例 1　计算如图 5-6 所示单向运动的中心快门的动力弹簧——压簧。

首先根据已知的各运动构件的尺寸和材料的比重，计算出各转动构件绕自身转轴的转动惯量和作直线移动构件的质量，计算数据如下：

小齿轮　$J_1=3.72\times10^{-7}\text{kg}\cdot\text{m}$

叶　片　$J_2=2.36\times10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}$

齿　环　$J_3=7.05\times10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}$

导　轮　$J_4=1.54\times10^{-7}\text{kg}\cdot\text{m}$

扇齿轮　$J_5=7.27\times10^{-6}\text{kg}\cdot\text{m}$

齿　条　$m_6=7.91\times10^{-2}\text{kg}$

已知各齿轮、齿环的齿数（模数 m 均为 0.8），以及齿环与导轮的接触半径如图 5-27 所示。各运动构件与齿条之间的速比计算如下

$$\frac{\omega_1}{v_6}=\frac{\omega_2}{v_6}=\frac{\omega_1}{\omega_3}\frac{\omega_3}{v_6}=\frac{Z_3'}{Z_1}\frac{2}{Z_2m}$$

$$=\frac{190\times2}{20\times228\times0.8}=104.2\text{m}^{-1}$$

$$\frac{\omega_3}{v_6}=\frac{2}{Z_3m}=10.96\text{m}^{-1}$$

$$\frac{\omega_4}{v_6}=\frac{\omega_4}{\omega_3}\frac{\omega_3}{v_6}=\frac{r_3''}{r_4}\frac{2}{Z_3m}=\frac{85.75\times2}{8\times228\times0.8}=117.5\text{m}^{-1}$$

$$\frac{\omega_5}{v_6}=\frac{2}{Z_5m}=\frac{2}{48\times0.8}=52.1\text{m}^{-1}$$

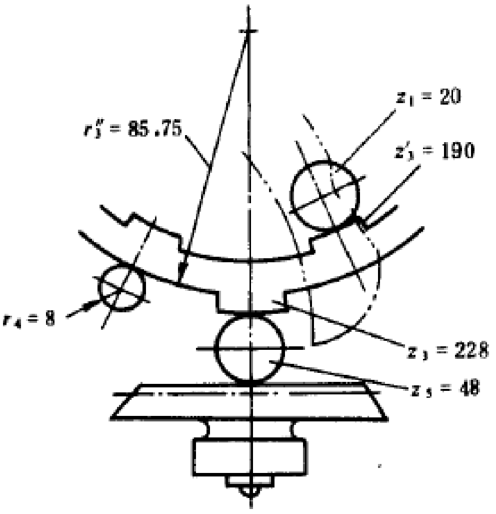


图 5-27　单向运动中心快门的传动机构

代入(5-49)式求得归化质量

$$m_{归}=5J_1(\frac{\omega_1}{v_6})^2+5J_2(\frac{\omega_2}{v_6})^2+J_3(\frac{\omega_2}{v_6})^2+5J_4(\frac{\omega_4}{v_6})^2+J_5(\frac{\omega_5}{v_6})^2+m_6$$

$$=0.02+1.28+0.08+0.01+0.02+0.08$$

$$=1.49\text{kg}$$

由上面的计算式可以看出叶片在整个快门的归化质量中占的比重最大，本例中占 86%。

假定本例中左右压簧的特性相同，且都是线性特性（图 5-26）。它们的工作情况是：当一端的压簧上紧时，另一端的压簧放松成自由状态。上紧的压簧驱动快门叶片工作，打开并关闭物镜光孔。当叶片转到刚好全部关闭物镜光孔时，另一端原来处于自由状态的压簧开始受压，吸收并储存起工作压簧释放的能量中的一部分，在跑出阶段起到缓冲作用。当快门释放结束时，左右两压簧的初压缩量相等。则左右压簧的推动力可由(5-54)式计算，弹簧释放时所做的功可由(5-56)式计算，对应最短曝光时间的最大力可由(5-60)式计算。对于 $m_{归}$ 是常量，(5-60)式可

写为

$$P_{max}=\frac{m_{归}f_{max}}{\eta_{机}t^2_{实min}}\left[\int_{f_1}^{f_2}\frac{df}{\sqrt{f(2f_{max}-f)}}\right]^2$$

$$=\frac{m_{归}f_{max}}{\eta_{机}t^2_{实min}}\left[\arcsin(\frac{f_2}{f_{max}}-1)-\arcsin(\frac{f_1}{f_{max}}-1)\right]^2 \quad (5\text{-}64)^{①}$$

设取齿条行程 $l_{max}=18.5\text{mm}$。对应的叶片转角为

$$\varphi_{max}=l_{max}\frac{\varphi_2}{\varphi_3}\frac{\varphi_3}{l}=l_{max}\frac{Z_3'}{Z_1}\frac{2}{Z_3m}$$

$$=18.5\times\frac{190\times2}{20\times228\times0.8}\times\frac{180°}{\pi}=110.4°$$

由结构选定叶片的开口角 $r=94°$(图 5-28)，则可得叶片的预跑角和制动角均等于

$$\varphi_{预}=\varphi_{制}=\frac{\varphi_{max}-\gamma}{2}=\frac{110.4°-94°}{2}=8.2°$$

即叶片刚要打开光孔时的角位置

$$\varphi_1=\varphi_{预}=8.15°$$

刚刚完全关闭光孔时的角位置

$$\varphi_2=\varphi_{max}-\varphi_{制}=110.4°-8.2°\doteq102.2°$$

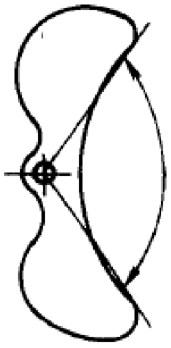


图 5-28　单向运动叶片的开口角

对应的齿条始末位置分别为

$$f_1=18.5\times\frac{8.2°}{110.4°}\approx1.4\text{mm}$$

$$f_2=18.5\times\frac{102.2°}{110.4°}\approx17.1\text{mm}$$

弹簧初压缩量 $f_c=f_1=1.4\text{mm}$，则上紧时的最大压缩量 $f_{max}=18.5+1.4=19.9\text{mm}$。将已经计算出来的 $m_{归}$、f_{max}、f_1 和 f_2 代入(5-64)式，并按本例中传动机构的实际情况取 $\eta_{机}=0.7$。又根据使用要求 $t_{实min}=1/100\text{s}$，最后得

$$P_{max}=\frac{1.49\times19.9\times10^{-3}}{0.7\times(1/100)^2}\left[\arcsin(\frac{17.1}{19.9}-1)-\arcsin(\frac{1.4}{19.9}-1)\right]^2=469\text{N}$$

最后根据求得的 P_{max} 和选定的 f_{max} 设计弹簧的结构参数。由弹簧设计的强度公式

$$d=\sqrt[3]{\frac{8D_2P_{max}K}{\pi[\tau]}}$$

及刚度公式

$$\frac{P_{max}}{f_{max}}=\frac{Gd^4}{8D_2^3n}$$

按选定的弹簧材料确定允许扭转极限应力[τ]及剪切弹性模数 G 后，可计算出弹簧中径 D_2，弹簧簧丝直径 d 和有效工作圈数 n，计算结果得：$D_2=20\text{mm}$，$d=3.5\text{mm}$，$n=8$ 圈。

例 2　计算反复运动的中心快门的动力弹簧。该快门叶片驱动机构的示意图如图 5-29 所示。O 轴是动力弹簧——扭簧的轴。当曲柄 1 绕 O 轴旋转时，通过连杆 2、摇杆 3 和五个连杆 4，

---

① 式中 arcsin(　)项的计算结果应以弧度为单位。

带动五个叶片往复摆动一次，完成打开和关闭物镜光孔的曝光过程。

计算动力弹簧的步骤也是先由已知的各运动构件的转动惯量或移动质量，计算它们折算到动力弹簧轴 O 上的归化转动惯量，然后根据已知的弹簧特性计算弹簧所做的功，或由(5-61)式直接求取为得到最短曝光时间所需要的弹簧最大力矩，最后把弹簧的结构参数设计出来。

由(5-52)式可写出本例中快门机构的归化转动惯量的表达式

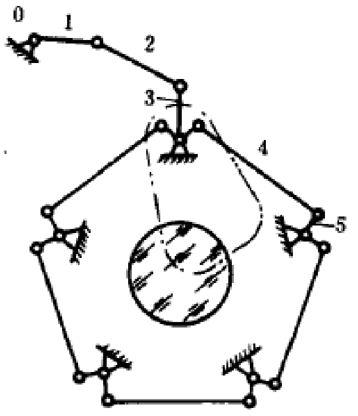


图 5-29 反复运动中心快门叶片驱动机构示意图

$$J_{归} = J_1 + m_2(\frac{v_2}{\omega_1})^2 + J_2\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + J_3\left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 + 5m_4\left(\frac{v_4}{\omega_1}\right)^2 + 4J_5\left(\frac{\omega_5}{\omega_1}\right)^2 \tag{5-65}$$

式中各构件的质量或转动惯量如下：

曲柄　$J_1 = 3.03 \times 10^{-6}$kg·m

连杆　$m_2 = 3.11 \times 10^{-3}$kg，　$J_2 = 2.04 \times 10^{-7}$kg·m

摇杆　$J_3 = 9.2 \times 10^{-6}$kg·m

连杆　$m_4 = 5.68 \times 10^{-3}$kg

叶片　$J_5 = 8.53 \times 10^{-6}$kg·m

需要说明的是，连杆 2 和连杆 4 都是作平面运动的构件，它们的动能等于质心的移动动能与绕质心转动的动能之和，所以要分别计算它们的质量和转动惯量。然而，在本例的实际机构中，连杆 4 的转动角速度始终很小，它的转动动能相对于移动动能可以忽略不计，因此，我们只计算它的质量。此外，在计算 J_3，把与 J_3 同轴的一个叶片的转动惯量也加入 J_3 中，所以式中最后一项只需计算四个叶片的 J_5。

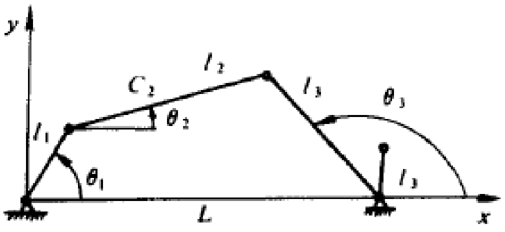


图 5-30 确定连杆机构位置的几何关系

(5-65)式中各速比项可由图 5-30 所示几何关系求得。曲柄 1、连杆 2 和摇杆 3 的角位置 θ_1、θ_2 和 θ_3 之间有如下关系

$$\left.\begin{aligned} l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 - L = l_3\cos\theta_3 \\ l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2 = l_3\sin\theta_3 \end{aligned}\right\} \tag{5-66}$$

连杆 2 质心 c_2 的位置为

$$\left.\begin{aligned} x_{C_2} = l_1\cos\theta_1 + \frac{1}{2}l_2\cos\theta_2 \\ y_{C_2} = l_1\sin\theta_1 + \frac{1}{2}l_2\sin\theta_2 \end{aligned}\right\} \tag{5-67}$$

将式中各项对 t 求导数可解得

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\mathrm{d}\theta_2/\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\theta_1/\mathrm{d}t} = \frac{l_1}{l_2}\frac{\sin(\theta_1 - \theta_3)}{\sin(\theta_3 - \theta_2)} \tag{5-68}$$

$$\frac{\omega_3}{\omega_1}=\frac{\mathrm{d}\theta_3/\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\theta_1/\mathrm{d}t}=\frac{l_1}{l_3}\frac{\sin(\theta_1-\theta_2)}{\sin(\theta_3-\theta_2)} \tag{5-69}$$

$$\begin{aligned}\frac{v_2}{\omega_1}&=\sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}x_{c_2}}{\mathrm{d}t}\right)^2+\left(\frac{\mathrm{d}y_{c_2}}{\mathrm{d}t}\right)^2}\Big/\frac{\mathrm{d}\theta_1}{\mathrm{d}t}\\&=\frac{1}{2}\sqrt{\left(2l_1\sin\theta_1+l_2\sin\theta_2\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2+\left(2l_1\cos\theta_1+l_2\cos\theta_2\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}\\&=l_1\frac{\sqrt{\sin^2(\theta_1-\theta_3)+4\sin^2(\theta_3-\theta_2)+4\cos(\theta_1-\theta_2)\sin(\theta_1-\theta_3)\sin(\theta_3-\theta_2)}}{2\sin(\theta_3-\theta_2)}\end{aligned} \tag{5-70}$$

由图 5-30 所示的机构传动关系可得

$$\frac{v_4}{\omega_1}=l_3'\frac{\omega_3}{\omega_1}=\frac{l_1l_3'}{l_3}\frac{\sin(\theta_1-\theta_2)}{\sin(\theta_3-\theta_2)} \tag{5-71}$$

$$\frac{v_5}{\omega_1}=\frac{\omega_3}{\omega_1}=\frac{l_1}{l_3}\frac{\sin(\theta_1-\theta_2)}{\sin(\theta_3-\theta_2)} \tag{5-72}$$

将(5-68)式至(5-72)式代入(5-65)式并简化可得本例快门机构的归化转动惯量

$$\begin{aligned}J_{归}(\theta_1)=J_1+l_1^2\{&m_2[\sin^2(\theta_1-\theta_3)+4\sin^2(\theta_3-\theta_2)\\&+4\cos(\theta_1-\theta_2)\sin(\theta_1-\theta_3)\sin(\theta_1-\theta_2)]/4\\&+J_2\sin^2(\theta_1-\theta_3)/l_2^2+(J_3+5m_4l_3'^2+4J_5)\\&\times\sin^2(\theta_1-\theta_3)/l_3^2\}/\sin^2(\theta_3-\theta_2)\end{aligned} \tag{5-73}$$

由上式可见，这种反复运动中心快门的归化转动惯量不是常量，而是机构位置的函数。

设本例中动力弹簧的特性也是图 5-26 所示的直线特性，则该扭簧释放时所做的功

$$\begin{aligned}A(\theta_1)&=\int_{\theta_{10}}^{\theta_1}M(\theta_1)\mathrm{d}\theta_1=\int_{\theta_{10}}^{\theta_1}\frac{M_{\max}}{\theta_{1\max}}(\theta_{1\max}-\theta_1)\mathrm{d}\theta_1\\&=\frac{M_{\max}}{2\theta_{1\max}}[2\theta_{1\max}(\theta_1-\theta_{10})-\theta_1^2+\theta_{10}^2]\end{aligned} \tag{5-74}$$

将(5-73)式和(5-74)式代入(5-63)式可得对应最短曝光时间的扭簧最大力矩

$$M_{\max}=\frac{\theta_{1\max}}{\eta_{机}\,t_{实\min}^2}\Delta\theta_1^2\left[\sum_{\theta=\theta_{11}}^{\theta_{12}}\sqrt{\frac{J_{归}(\theta_1)}{\sqrt{2\theta_{1\max}(\theta_1-\theta_{10})-\theta_1^2+\theta_{10}^2}}}\mathrm{d}\theta_1\right]^2 \tag{5-75}$$

式中 θ_{10}为扭簧全扭紧时曲柄 1 的初始角位置。当扭簧全扭紧时，图 5-30 中的曲柄 1 恰好与连杆 2 成一直线，因此

$$\theta_{10}=\arccos\frac{L^2+(l_1+l_2)^2-l_3^2}{2(l_1+l_2)L} \tag{5-76}$$

曲柄 1 的预跑角 $\theta_{1预}=30°$，对应于最短曝光时间 $t_{实\min}=1/100\mathrm{s}$ 的工作角 $\theta_{1实}=300°$，对应于 $M_{\max}$的 $\theta_{1\max}=600°$。因此(5-75)式中的积分上下限分别为

$$\theta_{12}=\theta_{10}+\theta_{1预}+\theta_{1实} \tag{5-77}$$

$$\theta_{11}=\theta_{10}+\theta_{1预} \tag{5-78}$$

快门的结构尺寸为：$l_1=8\mathrm{mm}$，$l_2=24\mathrm{mm}$. $l_3=20\mathrm{mm}$，$l_5=l_3'=8.5\mathrm{mm}$ 以及 $L=31.75\mathrm{mm}$。当 $\eta_{机}=0.85$ 时，取步长 $\Delta\theta_1=1°$，用数值积分式(5-75)计算得到 $M_{\max}=563\times10^{-3}\mathrm{N\cdot m}$。

§5-3 程序快门

程序快门是一种特殊型式的中心快门。就叶片数目、叶片的运动方式和快门的安装位置而言，它属于双叶片反复运动的镜后中心快门。但是，它的两个叶片既能控制曝光时间，又能限制成像光束的口径，是一种把快门和光圈合二为一的曝光量控制机构。采用程序快门的照相机物镜内，可以不必再设置可变光阑机构。所以，程序快门也叫做光阑快门，或光圈快门。程序快门虽然兼有快门和光圈双重功能，但是它的曝光时间和光圈数只能按照事先设计好的程序组合和调节，不能像快门和光圈分离的摄影仪器那样，可以分别选择和任意组合。这种按固定程序控制和调节曝光量的程序快门，虽然不能满足某些特殊的摄影需要，但是可以免除经验不足的摄影者选择曝光参数的困难。尤其是自动曝光控制的电子程序快门，摄影时不必做装定和调节曝光参数的任何操作，使用十分方便。因此，程序快门近年来发展很快，目前已成为普及型平视取景照相机中应用最广泛的一种快门型式。

5-3.1 程序快门的类型和结构

按照程序控制的方式，程序快门可分为机械控制的程序快门和电子控制的程序快门两类。机械控制的程序快门，简称机械程序快门，曝光时间和光圈数的组合程序由机械控制器（凸轮或曲线槽）控制和调节，一般用在有电测光系统的半自动控制曝光量的普及型照相机中，摄影时需用手拨动调节圈，直到发光二极管（LED）跳灯显示器或其它的显示器指示曝光合适为止。电子控制的程序快门，即所谓的电子程序快门，不需要人工参与调节，只要按下快门按钮，自动曝光控制电路就会根据测光系统输出的信号和事先设计好的曝光程序，自动控制和调节程序快门的曝光参数，满足像面曝光量的要求。

程序快门虽有不同的型式，但在结构上都有叶片数目少、驱动机构简单和可独立组装等共同的特点。尤其是在整体结构上，把机械零件、电磁驱动装置和控制电路的集成芯片与微型元件都集中组装在一块矩形平面基板上，使程序快门成为机电一体化的独立装配单元，从摄影物镜中分离出来，使物镜结构简化，成本降低，快门本身和照相机的结构工艺性和装配工艺性也进一步提高，更适合于小型照相机大批量生产的特点。

本节主要讨论程序快门的结构和特性。关于程序快门的电子控制系统原理将在第六章中讨论。程序快门的机械结构主要由叶片及其驱动机构和曝光程序控制机构两部分组成，此外还有闪光距离联动机构和副光圈等辅助机构。机械程序快门和电子程序快门在结构上的主要区别在于曝光程序控制机构，前者主要用凸轮或曲线槽等机械控制装置，后者主要用电磁控制装置。

一、叶片驱动机构

程序快门的两个叶片既是快门叶片，又是光阑叶片，它们构成通光孔的工作边和起遮光作用的挡光边的设计原理和方法与双片光阑相同，已在§4-3中作了分析。本节主要讨论驱动叶片作反复运动开闭物镜光孔的驱动机构的原理。目前在程序快门中应用较为广泛的典型结构有冲击摆轮、移动拉钩和单拨杆等型式。

1. 冲击摆轮驱动机构 这种驱动机构仅用于机械程序快门。图5-31为采用这种驱动机

构的机械程序快门结构示意图。叶片驱动机构主要由上弦板 1、摆轮 2 和叶片拨杆 3 组成。动力源有两根拉簧：主拉簧 5 和副拉簧 11。

快门上紧时，由卷片机构带动上弦板 1 向左移动，把主拉簧 5 上紧。当卷完一张片子时，上弦板的凸肩被锁钩 9 钩住，使上弦板不能返回，保持主拉簧的上紧状态。上弦板中部的单向撞爪 6 在上弦板左移上紧的过程中，遇摆轮撞钉 10 时，可绕轴逆时针转动。因此它的斜面 B 在撞钉上滑移而过，既不会妨碍上弦板的左移，也不会改变摆轮的位置。叶片 4 在上紧过程中保持足够的防漏光重叠量，可靠地关闭物镜光孔。单向撞爪滑过撞钉后，立刻在轴上扭簧的作用下复位。柱销 7 决定了单向撞爪在快门释放时撞击摆轮撞钉的工作位置。图 5-31 中各机构的位置恰是快门上紧时的位置。

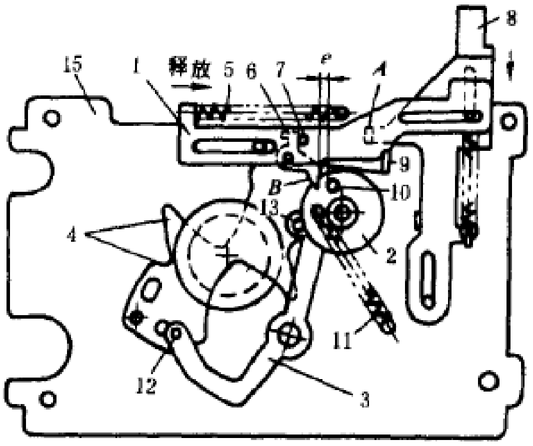


图 5-31　冲击摆轮式机械程序快门机构

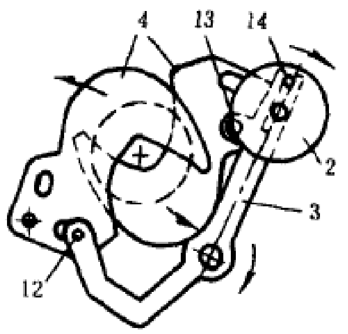


图 5-32　摆轮受冲击后推动叶片打开光孔

快门释放时，按下快门释放钮，释放板 8 下降。释放板的突起 A 解脱锁钩 9 对上弦板 1 的锁定，主弹簧 5 释放，上弦板迅速右移。由于快门上紧时在单向撞爪与摆轮撞钉之间预留有一段冲击行程 e，因此当单向撞爪随上弦板跑过这段行程碰撞摆轮撞钉 10 时，已具有一定的速度和冲击力。摆轮 2 在此冲击力作用下顺时针旋转。如图 5-32 所示，一方面通过销钉 14 与叶片拨杆 3 上端滑槽的配合，推动拨杆绕轴顺时针转动，并以其拨销 12 和 13 使两个叶片 4 绕各自的轴向外摆动，打开物镜光孔；另一方面把副拉簧 11 上紧。由图可见，这种快门叶片的结构布置和运动方式与 § 4-2 中所述的对摆式双片光阑相同。

叶片拨杆 3 的长拨销 12 伸入程序控制盘（见图 5-34）的曲线槽内，其行程受曲线槽曲线工作边 ab 的限制。当长拨销 12 碰到曲线边 ab 时，叶片拨杆 3 不能再继续转动，叶片所能打开的光孔面积也就受到了限制。这时，副拉簧 11 开始释放，拉动摆轮 2 逆时针转动，拨杆 3 和叶片 4 也都反向旋转，关闭光孔，完成一次曝光过程。

由上述快门的工作过程可见，上弦板的作用并不是直接驱动叶片，而是把主拉簧的势能转变成冲击摆轮的动能。摆轮受冲击后靠惯性继续运动，推动叶片打开光孔。摆轮在驱动机构里不仅起着直接驱动叶片反复运动的作用，而且起着传递能量和转变能量的作用。在快门的打开阶段，它把上弦板的一部分动能传递给叶片，把另一部动能转变成副拉簧的势能暂时储存起来。在快门的关闭阶段，副拉簧再把势能转变成叶片反向运动的动能。因此，摆轮的质量要做得比较大，以便吸收和传递足够的能量。

2. 拉钩驱动机构　图 5-33 所示为采用这种驱动机构的电子程序快门结构示意图。如图所示，这种快门的两个叶片布置成剪式结构。叶片驱动机构由上弦板 19、拉钩 17 和叶片拨杆 16 组成。拉钩是这种驱动机构中直接驱动叶片和控制叶片开闭光孔的构件。

快门上紧时，拉钩随上弦板左移，当其左端斜面 F 遇到叶片拨杆 16 上端的突起 G 时，从

G 的下面滑过，同时拉钩绕轴逆时针摆动一个小角度后，在轴上扭簧 18 的作用下复位。上弦板继续左移直至被释放杆 3 锁定，主弹簧 20 被保持在上紧状态。

快门释放时，拉钩随上弦板向右移动，其左端钩住叶片拨杆的突起 G，带动叶片拨杆 16 顺时针转动。一方面推动剪式双叶片打开物镜光孔，另一方面把叶片拨杆轴上的扭簧 15 上紧。当拉钩右端的尾部 E 碰到 V 形杠杆 6 的上臂时，被迫逆时针转动，其左端钩头下降，释放叶片拨杆 16 的突起 G。叶片拨杆在扭簧 15 的作用下逆时针转动，使两片叶片反向旋转关闭光孔。

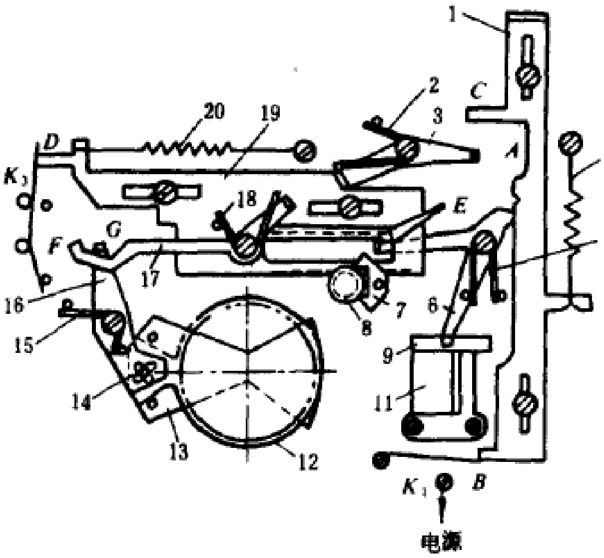


图 5-33 拉钩式电子程序快门机构

这种叶片驱动机构还有简单的擒纵式阻尼系统，仅由一对卡子 7 和卡子轮 8 组成。卡子轮与上弦板 19 下沿的齿条啮合，因此当快门释放时，上弦板的移动受到擒纵机构的阻尼而减慢，从而延长快门的全开时间。

二、曝光程序控制机构

曝光程序控制机构是程序快门中决定曝光时间和光圈数组合程序的机构。机械程序快门的曝光程序控制机构一般是凸轮或程序控制盘的曲线槽。电子程序快门则用自动曝光控制电路控制的电磁铁来实现程序曝光控制。

1. 机械程序快门的曝光程序控制机构 图 5-34 所示为机械程序快门常用的程序控制盘，它通常置于物镜内外筒的环形空间内，可由物镜外筒上的调节圈拨动绕物镜的光轴转动。程序快门的曝光程序由控制盘曲线槽的曲线边 ab 决定。以图 5-31 所示冲击摆轮式机械程序快门为例，曲线边 ab 上的各点到光轴 0 的半径不同，因而对长拨销 12 的行程有不同的限制。例如，当控制盘转到曲线槽的 a 端对着长拨销时，长拨销在曲线槽里的行程最长，叶片能够把物镜的光孔全部开启后再关闭，因此所得到的光圈数最小(该光圈数对应于物镜的最大相对孔径)，同时叶片从开始打开光孔到完全关闭光孔所经历的时间也最长，也就是快门的曝光时间最长。如果逆时针转动图 5-34 所示的控制盘，随着曲线边半径的增大，长拨销 12 在曲线槽里的行程越来越短，叶片能够开启的光孔面积也越来越小，对应的光圈数则越来越大，而曝光时间却越来越短。当调速盘转到 b 端对向长拨销 12 时，程序快门达到最大光圈数和最短曝光时间。因此，程序快门的曝光程序一般是长曝光时间与小光圈数组合，短曝光时间与大光圈数组合。控制盘曲线槽 ab 曲线的设计，一般是使它所决定的光圈数沿等间隔转角按标准光圈系列逐档改变，以便调节圈上的光圈数字均匀分布。

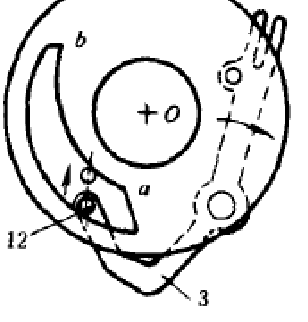


图 5-34 机械程序快门的程序控制盘

2. 电子程序快门的曝光程序控制机构 电子程序快门的曝光程序控制机构主要由电磁铁和与衔铁联动的杠杆机构组成。

在图 5-33 所示的拉钩式电子程序快门中，由电磁铁 11 控制的衔铁 9 和 V 形杠杆 6 组成

了曝光程序控制机构。当电磁铁通电吸合衔铁时，V 形杠杆被锁定在图 5-33 所示位置，它的上臂不会妨碍拉钩在右移的运动中驱动叶片开启光孔。当电磁铁断电释放衔铁时，V 形杠杆在轴上扭簧 5 的作用下迅速顺时针转动，它的上臂把拉钩 17 的右端向上抬起，迫使拉钩逆时针转动，它的左端下降并脱开叶片拨杆 16 的上端突起 G，扭簧 15 释放，叶片拨杆使叶片关闭光孔。从上弦板开始释放到电磁铁断电的时间间隔由自动曝光控制电路控制和调节。按下快门揿钮时，释放板 1 下降，首先接通电源开关 K_1，使电磁铁通电，然后由突起 C 解脱释放杆 3 对上弦板的锁定，拉簧 20 释放，上弦板迅速右移，一方面使叶片开启光孔，另一方面使开关 K_3 断开，延时电路开始工作。自动曝光控制电路根据测光系统的输出信号和引入的曝光参数自动解算和控制延时电路的工作时间，当达到所需要的延时后，电磁铁断电，释放衔铁 9，并通过 V 形杠杆和拉钩释放叶片拨杆的扭簧 15，叶片关闭光孔。

这种电子程序快门的缺点是不能由电子电路来进行自拍控制，因为快门的开启完全受释放板释放上弦板的机械动作控制。

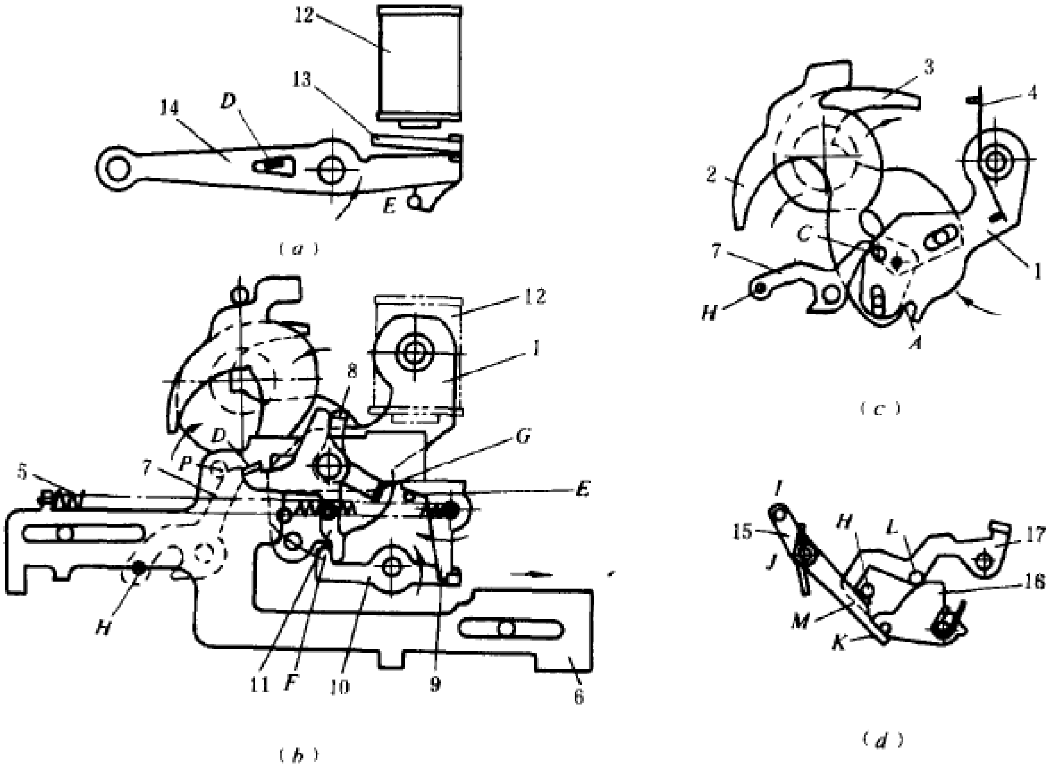


图 5-35 ZK-241 型电子程序快门机构

图 5-35 所示为 ZK-241 型电子程序快门的机构原理图。这种快门的释放钮(图中未画出)与快门的开启机构没有任何机械上的联系。按下释放钮仅切换电路中的开关，在不用电子自拍时，使电磁铁 12 通电吸合衔铁 13(图 a)，并联动杠杆 14 逆时针转动。杠杆下面的拨钉 E 推动靠杆 9(图 b)顺时针转动，其下端解脱对开门杠杆 10 的锁定，使开门杠杆在轴上扭簧的作用下逆时针转动，其左端钩头 F 从叶片拨杆 1 的凹槽 A(图 c)内脱出，扭簧 4 释放，拨杆 1 顺时针旋转，通过它上面的滑槽和叶片 2 和 3 上的销钉的传动，使剪式双叶片开启物镜光孔。电磁铁通电时间的长短由自动曝光控制电路控制和调节。只要电磁铁保持通电，杠杆 14 就通过它中部的孔(图 a)对支承片 11(图 b)左臂端伸入该孔内的突起 D 的限位，使锁杆 8 的 G 端保持对上弦板 6 的锁定，已上紧的拉簧 5 不能释放，叶片就保持开启状态。

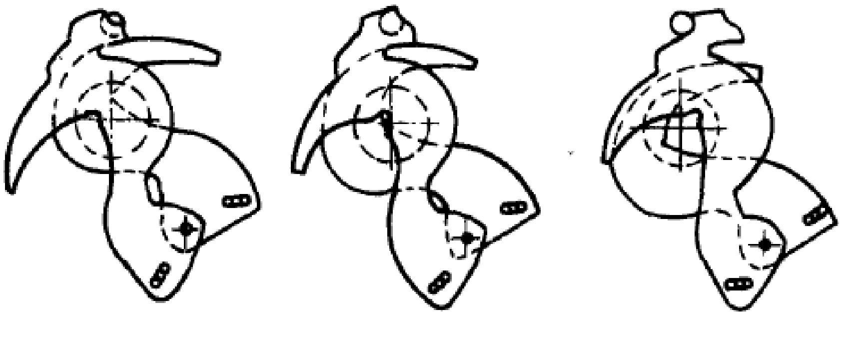
当自动曝光控制电路使电磁铁断电时，连杆 14、支承片 11 和锁杆 8 在各自轴上扭簧的作用下顺时针复位，解除对上弦板的锁定，拉簧 5 释放，上弦板迅速右移，(通过销子 P)推动限位拨杆 7。限位拨杆又通过固定在叶片拨杆 1 上的销钉 C(图 c)推动叶片拨杆逆时针转动，一方

面使叶片关闭光孔，另一方面把叶片拨杆轴上的扭簧 4 上紧，为下一次曝光时开启叶片储备能量。

如上面所述，这种快门有两个动力弹簧。扭簧 4 释放时推动叶片拨杆 1 使叶片开启；拉簧 5 在卷片时被左移的上弦板 6 上紧，释放时推动叶片拨杆反向转动，使叶片关闭，并同时上紧扭簧 4。拉簧 5 为叶片的开启和关闭动作提供总能量，所以它是快门机构的主弹簧。

由于这种快门的开启和关闭都由一个电磁铁来控制，因此，只要用自拍板手把电路切换到自拍控制状态，按下快门释放钮就不会使电磁铁立刻通电。只有当自拍延时电路达到所需要的自拍延时时间后，才会使电磁铁通电把快门打开，因而不需要增加电磁铁和其它的锁定机构就能实现电子自拍控制。

这种电子程序快门的曝光控制机构还设有副光圈，能够在曝光的瞬间进行实时测光和实时曝光控制。所谓副光圈，实际上是在一个快门叶片的外缘设计了一个能遮挡测光元件窗孔的凸缘(见图 5-36)，利用该凸缘随叶片的运动开闭测光窗。



(*a*) 低照度检测　(*b*) 停止低照度检测　(*c*) 实时测光

图 5-36　副光圈实时测光

如图 5-36(*a*)所示，在快门叶片完全关闭时，副光圈将测光窗遮住一半。这时测光元件检测外界光强是否低于快门曝光范围的最低光强。若低于最低光强，就输出低照度告警信号，使低照警告灯(红色 LED)闪烁。

当电磁铁通电，快门叶片开始转动而尚未开启光孔时，副光圈先把测光窗全部遮住，如图 5-36(*b*)所示。测光元件停止低照度测试，为转入实时测光作好准备。

随着快门叶片的继续转动逐渐开启光孔，副光圈迅速开启测光窗，如图 5-36(*c*)所示。于是，测光元件就在快门曝光的同时对外界景物进行测光。测光元件的受光量以一定的比例代表感光材料通过快门所获得的实际曝光量。尤其在被摄景物的亮度随时间变化较快时，例如景物中有闪烁的发光物体或在日光下使用闪光灯摄影，这种实时测光的方法能够提高测光和曝光量控制的准确性。

三、闪光距离联动机构

使用闪光灯摄影时，被摄物的照度取决于闪光灯的光强和摄影距离。在闪光灯光强一定的情况下，拍摄不同距离的物体，应采用不同的光圈数。摄影距离愈近，光圈数应愈大；反之，摄影距离愈远，光圈数应愈小。ZK-241 型电子程序快门设有距离联动机构，能够在使用闪光灯摄影时，根据不同的摄影距离调节快门叶片开启光孔的大小。

如图 5-35(*d*)所示，使用内藏闪光灯时，距离调节杠杆 15 的 *I* 端将与调焦环的内凸轮面接触。当拨动调焦环装定不同的摄影距离时，杠杆 15 的 *K* 端将使凸轮 16 以不同的弧段与光圈控制连杆 17 中部的靠钉 *L* 接触，故使连杆 17 的左端弯钩 *M* 处于不同的位置。弯钩 *M* 又通过

销钉 H 使限位拨杆 7 限制叶片拨杆 1 在开启叶片时的最大转角，因而也就限制了叶片开启光孔的大小。例如，当拍摄较近物体时，调焦环装定在近距离上，其内凸轮面使距离调节杠杆 15 控制凸轮 16 以高弧与靠钉 L 接触。光圈控制连杆 17 的弯钩 M 通过限位拨杆上的拨钉 H 使限位拨杆 7 的上臂与叶片拨杆 1 的销钉 C 的距离缩小。快门释放时，叶片拨杆 1 的转角受到限位拨杆 7 的限制，只能开启较小的光孔。反之，当摄影距离较远时，凸轮 16 将使叶片拨杆 1 有较大的开启转角，叶片就能开启较大的光孔。

距离调节杠杆 15 的转轴 J 的位置还能随所装定的胶片感光度的不同而改变。例如，当装入较高感光度的胶卷时，可以拨动物镜端面的感光度调节手轮装定相应的感光度数值，这时感光度调节手轮的内凸轮面会使 J 的位置向左移动，其结果与近距离联动调节一样，使叶片拨杆 1 的开启角减小。

5-3.2 程序快门的特性

程序快门的工作特性有两种表示形式，一种像一般快门那样，用快门打开的物镜光孔（或成像光束）截面积 S 随快门工作时间 t 变化的曲线（图 5-37）来表示快门的通光特性，另一种是程序快门特有的形式，即用通光孔面积所对应的光圈数 F 与有效曝光时间 t 的关系曲线（图 5-38）来表示程序快门曝光参数 F 和 t 的组合程序。为了便于区别，前者称为程序快门的通光特性曲线，后者称为程序特性曲线，或简称程序曲线。

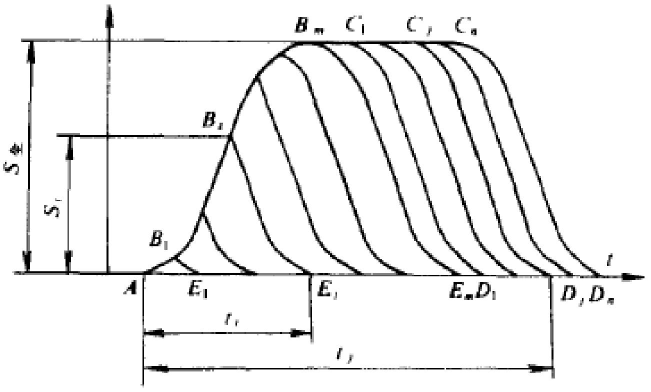


图 5-37 程序快门的通光特性曲线

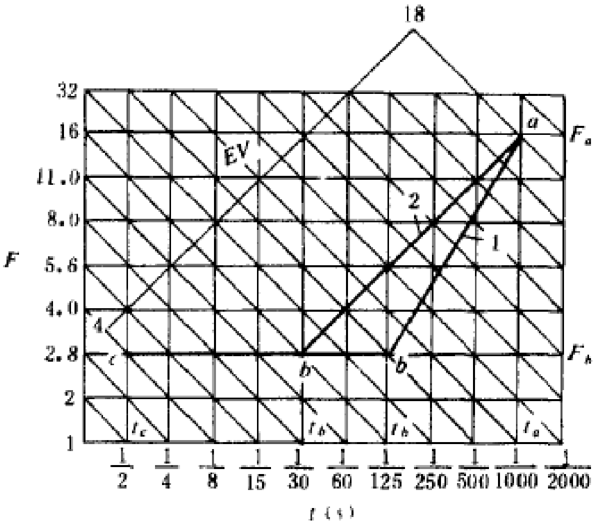


图 5-38 程序快门的程序曲线

为了与摄影曝光量的加法系统（见 § 6-1）一致，程序曲线采用以 2 为底的对数坐标。因此，纵坐标的等分刻度值为光圈数 F 的标准系列数值，横坐标为有效曝光时间的标准系列数值。图中斜线的坐标为曝光值 EV（其意义见 § 6-1）。

由图 5-37 和图 5-38 可见，程序快门的通光特性曲线和程序曲线都可以分为两个明显不同的阶段：

1. 双参数控制段 在双参数控制段内，程序快门的两个曝光参数 F 和 t 同时改变来控制和调节像面曝光量。表现在通光特性曲线图（图 5-37）上是一簇形状接近三角形的曲线 AB_1E_1、…、AB_iE_i、…、AB_mE_m，说明程序快门在这一段范围内没有全开阶段。实际上除曲线 AB_mE_m 所表示的情况外，快门叶片是在还没有把物镜光孔全部打开时就开始关闭，快门的通光面积 $S_i < S_全$。与这一簇通光特性曲线相对应，图 5-38 中的程序曲线 ab 是一条倾斜的直线（严格地说是

一条曲线，但为了简化讨论，往往用一条直线来近似表示)。无论从通光特性曲线还是程序曲线上都可以明显地看出，程序快门光圈数与曝光时间的组合规律是，曝光时间愈长，光圈数愈小(通光孔面积愈大)；反之，曝光时间愈短，当圈数愈大(通光孔面积愈小)。这个规律是由程序快门的结构决定的。需要说明的是图 5-37 中对应于某一光孔面积 S_i 的 t_i 是实际曝光时间，这只是为了便于表示光孔面积与曝光时间的关系。有时为了简化或仅作粗略估算，把程序快门的打开阶段和关闭阶段的特性曲线看作是直线，也就是近似认为程序快门在这一段工作范围内的通光效率 $\eta=50\%$，那末有效曝光时间约等于实际曝光时间的一半。

2. 单参数控制段 在这一段工作范围内，程序快门的通光面积达到最大值 $S_{全}$，对应的光圈数达到最小值 F_{min}，且保持在该值不变。当外界景物亮度改变时，仅改变曝光时间 t 来控制和调节像面曝光量，因此称为单参数控制段。在图 5-37 中，通光特性在这一段工作范围内是一簇形状近似梯形的曲线，$AB_mC_jD_j$、…、$AB_mC_jD_j$、…、$AB_mC_nD_n$，说明程序快门在该控制段有全开阶段，快门的通光效率随全开阶段持续时间的增长而提高，$\eta>50\%$。与这一簇通光特性曲线对应，单参数控制段的程序曲线如图 5-38 所示为一条水平线 bc，这条水平线的长度随程序快门的类型而不同。大多数机械程序快门的单参数控制段很短(如冲击摆轮式机械程序快门)。增加阻尼机构(如图 5-33 中的擒纵式阻尼机构)可以把程序曲线向长曝光时间一端延伸。电子程序快门因为用电磁铁控制快门叶片的开闭，所以在理论上可以无限延长快门的曝光时间。然而，程序快门一般用于普及型相机，不需要太宽的曝光范围，所以程序曲线水平段的长度只要满足常用的摄影曝光范围就够了。

程序曲线上双参数控制段 ab 和单参数控制段 bc 的交点 b 叫做程序曲线的转折点。转折点的横坐标 t_b，也就是转折点所对应的有效曝光时间和双参数控制段 ab 的斜率 γ 是程序快门的两个重要的特征参数。

按 t_b 的大小可以把程序快门分为两种类型(图 5-38)：

(1)速度重点型，如图中程序曲线 1 所示。这一类程序快门的程序曲线的转折点曝光时间较短，双参数控制段斜率 γ 较大，即 ab 线较陡，曝光参数的组合以短曝光时间为主，因此适合于拍摄运动物体。

(2)通用程序型，如图中曲线 2 所示。转折点的曝光时间较长，但在手持式照相机中一般都不大于产生手振的曝光时间(1/30s～1/60s)，相应地 γ 较小。这类程序快门兼顾景深和速度，适用于一般的摄影条件。

程序曲线两端点 a 和 c 的坐标表示程序快门的曝光范围，常用 EV 值表示。例如图 5-38 中的程序曲线所表示的曝光范围为 $EV4$～18，相当于 $F2.8$，1/2s～$F16$，1/1000s。

这种快门与光圈合一的程序快门只有一条程序曲线，称为单程序曝光控制。只有在快门与光圈分离的照相机里才可能实现多程序曝光控制。然而，这种照相机里的快门本身并不是程序快门，而是由自动曝光控制电路或微电脑进行多程序曝光控制的焦面快门或中心快门。

5-3.3 程序快门程序曲线的计算方法

程序快门设计的最终目的是要得到满足使用要求的程序曲线。如前面所述，程序快门的程序曲线是有效曝光时间 t 和光圈数 F 的固定组合关系的图解形式。以图 5-38 所示程序曲线为例，在双参数控制段，程序曲线 ab 常用一条斜率为 γ 的直线来近似表示，其直线方程为

$$\mathrm{AV} = \mathrm{AV}_a - \gamma(\mathrm{TV}_a - \mathrm{TV}) \tag{5-79}$$

式中 AV 和 TV 分别为光圈值和时间值(定义见§6-1),即

$$\left.\begin{aligned} AV = \log_2 F^2, TV = \log_2(1/t) \\ \text{及} \quad AV_a = \log_2 F_a^2, TV_a = \log_2(1/t_a) \end{aligned}\right\} \tag{5-80}$$

在单参数控制段,F 不随 t 改变,程序曲线是一条水平线,其方程为

$$AV = AV_b = \log 2F_b^2 \tag{5-81}$$

程序曲线上各点的 F 数是由叶片所打开的通光面积来决定的,t 则是叶片从打开到关闭给定面积的光孔所需要的时间。因此,t 与程序快门机构的运动特性有关,F 只是机构位置的函数,与机构的运动特性无关。

一、光圈数 F 的确定

在§4-3 中已经简述了双片光阑通光面积的计算方法。对于程序快门的设计来说,需要由给定的 F 数求取机构中某些构件的位置,例如图 5-34 所示长拨钉 12 的位置,以便设计程序控制盘曲线槽的工作曲线。因为由两个叶片构成的光孔形状不像虹彩光阑孔那样规则,所以往往不能直接用简单的数学表达式来表示通光面积 S_d 与叶片角位置 φ 的函数关系,一般是通过计算离散的点得到一系列 φ 与 S_d 的数值表,再由 $F=2\sqrt{S_d/\pi}$,得到 φ 与 F 的数值表,然后用插值法由给定的 F 数(一般取标准系列中的数值)求得 φ 和机构中所需要的其他构件的位置。

对于半自动控制曝光的机械程序快门来说,程序控制盘(图 5-34)一般由镜头上的调节环直接拨动。为了使调节环上供参考用的光圈刻度等间隔分布,控制盘上曲线槽的工作曲线应设计成如下形式:

$$\rho = f(F), \qquad \theta = n\Delta\theta \tag{5-82}$$

式中 ρ、θ 为曲线槽工作曲线上给定点的极坐标;$\Delta\theta$ 为选定的调节环上的刻度间隔;F 为光圈数,一般用第 I 标准系列中的数值。

二、有效曝光时间 t 的计算

计算程序快门对于给定 F 数的 t 值,可根据§5-2.2 关于叶片作变速、反复运动的中心快门曝光时间的计算原理和方法,针对程序快门的具体结构参数和动力弹簧的特性来进行。这里主要讨论程序快门计算的几个特点:

(1)程序快门一般有两根动力弹簧,其中一根为机构的整个运动过程,包括快门的打开阶段和关闭阶段提供能量,称为主弹簧;另一根仅为快门的关闭阶段提供能量,(如图 5-31 中的拉簧 11,图 5-33 中的扭簧 15),或为开启阶段提供能量,(如图 5-35 中的扭簧 4),称为副弹簧。副弹簧一般是在主弹簧释放过程中同时被上紧的。因此在计算弹簧所做的功时应考虑打开阶段和关闭阶段的不同情况。例如,图 5-33 所示的程序快门,在打开阶段既有主弹簧 20 做正功,又有副弹簧 15 做负功,在关闭阶段仅有副弹簧做正功;而图 5-35 所示程序快门恰好相反,在打开阶段仅有副弹簧 4 做正功,在关闭阶段既有主弹簧 5 做正功,又有副弹簧 4 做负功。

(2)在计算归化质量或归化转动惯量时要考虑到打开阶段和关闭阶段参与运动的构件也不完全相同。例如,图 5-33 所示的拉钩驱动机构中,在打开阶段参与运动的构件有上弦板 19、拉钩 17、擒纵机构的卡子 7 和卡子轮 8,叶片拨杆 16 和两个叶片 12、13,而在关闭阶段的运动构件只有叶片拨杆和两个叶片。

对于图 5-31 所示的冲击摆轮驱动机构来说,上弦板在完成对摆轮的冲击后,不再参与快

门的工作，快门的打开和关闭都靠摆轮受撞击后获得的动能来驱动。在打开阶段和关闭阶段，运动系统由相同的构件(摆轮 2、叶片拨杆 3 和叶片 4)组成。

(3)冲击摆轮式程序快门计算时，除了要计算打开阶段和关闭阶段的动能外，还要考虑两次碰撞过程：

上弦板的单向撞爪 6 对摆轮撞钉 10 的碰撞，上弦板把主弹簧释放的能量通过这次碰撞传递给摆轮，使摆轮获得初动能；

长拨钉 12 对程序控制盘曲线槽曲线工作边的碰撞，长拨钉在碰撞后有一定的回弹，因而使摆轮、拨杆和叶片组成的运动系统获得反向运动的初动能。

对于碰撞过程中动能的转变和损失，以及碰撞前后运动速度的变化，可以运用理论力学关于碰撞的动能定理或动量定理来计算。

(4)对于有擒纵式阻尼机构的程序快门(如图 5-33 所示)，还要考虑阻尼机构消耗的动能。

(5)对于电子程序快门来说，还应考虑电磁铁由通电(或断电)到衔铁和杠杆机构使叶片开始运动的迟滞时间，对计算结果进行必要的修正。

在各档光圈 F 及其对应的有效曝光时间确定后，即可绘制程序曲线。如果程序曲线不能满足要求，再修改程序控制机构、叶片驱动机构或动力弹簧的结构参数。

§5-4 百叶窗快门

百叶窗快门按片板的运动特性也可分成单向和反复运动两类。两种型式的快门，每曝光一次，片板都是旋转 180°。所不同的是，单向运动的快门片板从开启到关闭向一个方向转 180°，下一次曝光时则向相反方向转 180°；反复运动的快门片板在打开时只转 90°，然后反方向转 90°回到原来位置关闭光孔。

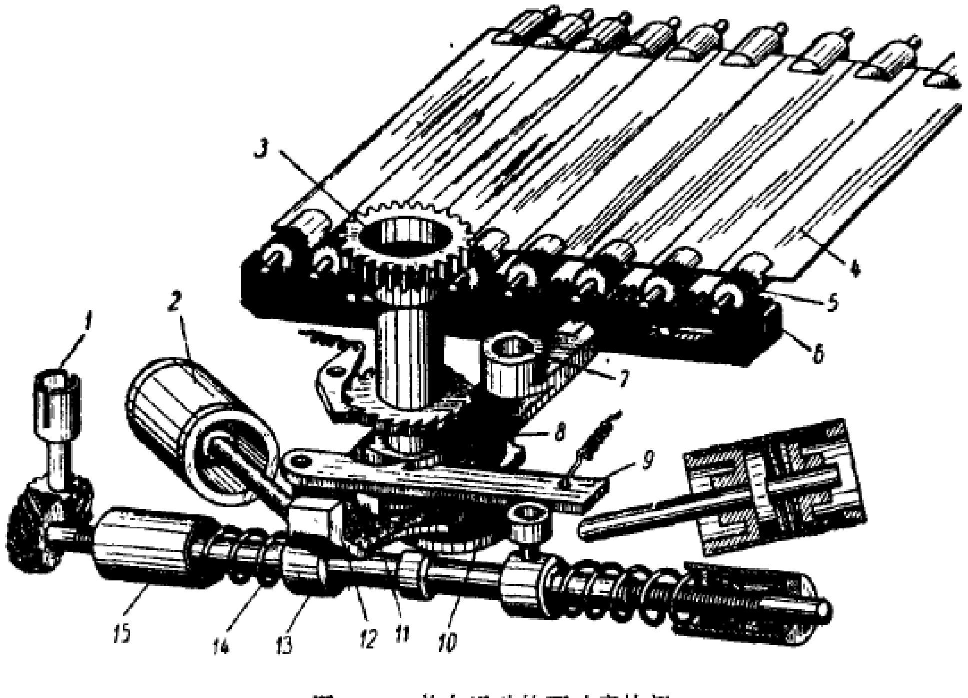


图 5-39 单向运动的百叶窗快门

图 5-39 是一种单向运动的百叶窗快门。旋转运动由齿轮 3 传给凸轮 8 和偏心轮 10。偏心轮 10 在旋转过程中交替地压在左右两个滑块 13 上，通过滑块 13 上紧动力弹簧 14。交替上紧的左右两个动力弹簧 14，使齿条 6 能向左右两个方向运动，它是靠推动绕轴 7 旋转的杠杆 12

的一端实现的。与偏心轮 10 同轴的凸轮 8 的作用是推动杠杆 9，使凸块 11 挡住杠杆 12。这样，当偏心轮 10 在上紧了一侧(例如图中所示为左侧)的弹簧后离开滑块 13 时，只有当凸轮 8 控制杠杆 9 使凸块 11 脱开杠杆 12(如图中所示)，杠杆 12 才能在已上紧的弹簧 14 的作用下迅速转动，并推动齿条 6 经小齿轮 5 使片板旋转，完成曝光过程。曝光完毕后，杠杆 12 被凸块 11 在另一侧挡住，以防止弹簧回弹使光孔二次被打开。偏心轮 10 继续旋转，压缩另一端的动力弹簧 14。开始第二个工作循环。为了减轻快门制动时的撞击现象，利用气动减振器 2 吸收动能。快门曝光时间是通过轴 1 后的齿轮和螺旋传动，改变弹簧的初压缩量来调节和装定的。

百叶窗快门永远不能使物镜光孔全部面积都打开，因为快门的片板始终留在光路中，实际有效光孔面积一般要减少 2～5%。另外，为了在关闭位置不致漏光，片板之间有重叠。

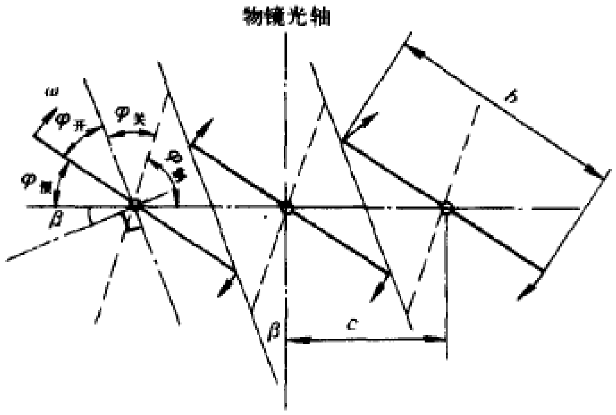


图 5-40　单向运动的百叶窗快门的开闭过程

从片板的运动(图 5-40)显然可见，整幅相片并不是同时曝光的，而是以与片板平行的窄条形式随片板运动方向顺序曝光。这在拍摄动体或在拍摄过程中相机是运动的情形中就会带来影象变形。而且，由图 5-40 可以导得

$$t_{实} = \frac{2}{\omega}\left[\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{c}{b}\cos\beta\right)\right] \quad (5\text{-}83)$$

即 $t_{实}$ 与 β 角有关，相片沿与片板轴成垂直的方向上曝光是不均匀的。

这种快门在片板作单向连续运动时，没有全开阶段，因此，通光效率不会超过 0.5，考虑到片板停留在光孔中的遮光作用，实际通光效率不会超过 0.45，通光效率还随 β 角的不同而不同。

§ 5-5　帘幕快门

5-5.1　帘幕快门的类型和结构

帘幕快门是焦面快门的主要型式。按制造帘幕的材料，可以把帘幕快门分为布帘快门和金属帘快门两大类。布帘材料有涂以橡胶的绢或化纤布、不透光的塑料薄膜等，金属帘材料有薄钢带、薄钢片等。布帘易卷绕，价格低廉，在很长时期内是制造卷帘的主要材料。但是它的机械强度低，性能受温度和湿度变化的影响大，易老化，工作寿命短，最短曝光时间一般只能达到 1/1000～1/2000s。金属帘幕机械强度高，不易老化，寿命长，对温度和湿度不敏感，因而最短曝光时间可达 1/2000～1/4000s。

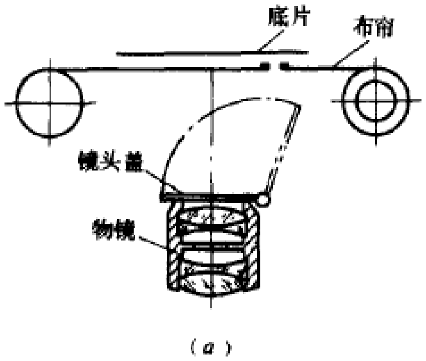
在结构上，布帘快门通常是用卷轴卷绕布条的两端，并用卷轴的旋转带动布帘在焦平面前面移动，使曝光缝切割成像光束截面积，控制感光材料的曝光时间。所以，这种卷轴式结构的帘幕快门也叫做卷帘快门。金属帘快门最初也做成卷帘结构。可以被卷绕到转轴上的金属帘幕有两种型式：一种用窄条钢片互相钩搭，联结成可卷曲的链带；另一种用质轻而高强度的薄钢带，如钛箔制成卷帘。后者结构更简单、更轻也更耐用。60 年代初出现并得到迅速发展和广泛应用的钢片快门，不用卷帘结构，而用连杆机构控制的薄钢片组来构成运动的帘幕，从而使帘幕快门能够与相机本体分离，成为可以独立组装的部件。钢片快门曝光缝的运动方向也与传统

的卷帘快门不同，由沿底片画幅的长边(36mm)方向"横走"改为沿短边(24mm)方向"纵走"。因此，钢片快门也称为纵走式帘幕快门，以与传统的横走式帘幕快门相区别。曝光缝纵走幅面可提高使用脉冲闪光灯(X 连闪)的最低快门速度，减小拍摄运动物体的像模糊量和像变形量，改善像幅曝光的均匀性。

按照构成曝光缝的方式，帘幕快门可分为单帘快门和双帘快门两种。单帘快门只用一条带狭缝的帘幕在感光材料前面移动来使感光材料曝光。所以，在上紧快门时要增加保护帘(如图 5-3 所示)或镜头盖[如图 5-41(*a*)所示]等附加的遮光措施，防止布帘上的狭缝返回时使感光材料曝光。双帘快门用两条布帘或金属帘，或两组叶片构成曝光缝。上紧时，两帘保持互相重叠，曝光缝完全关闭，因此不需要附加遮光结构。释放时，两帘先后开始运动，先开始运动的帘幕称为前帘，后开始运动的帘幕称为后帘。改变后帘滞后于前帘开始运动的时间就可以方便地调节曝光缝的宽度，因此，双帘快门可调节的曝光时间范围比单帘快门宽。

一、单帘快门

图 5-41 是一种用于航空侦察相机的单布帘快门的结构原理图。布帘的两端分别卷绕在上紧轴和弹簧筒上。狭缝直接开在布帘上，并用薄铝框加固。上紧时，电机(图中未画出)通过齿轮传动链，使上紧轴旋转，把原来卷在弹簧筒上的布帘卷到上紧轴上，同时把弹簧筒内的动力弹簧(扭簧)上紧。在快门上紧过程中，镜头盖[图 5-41(*a*)]紧闭物镜筒的后端面。因此，当曝光缝向右越过底片幅面时，没有光线落到感光材料上。快门释放时，释放机构首先把镜头盖打开，接着释放动力弹簧。弹簧筒反向旋转卷绕布帘，狭缝迅速左移使底片曝光。曝光结束后，镜头盖重新盖住物镜的出口，以免下一次上紧快门时漏光。



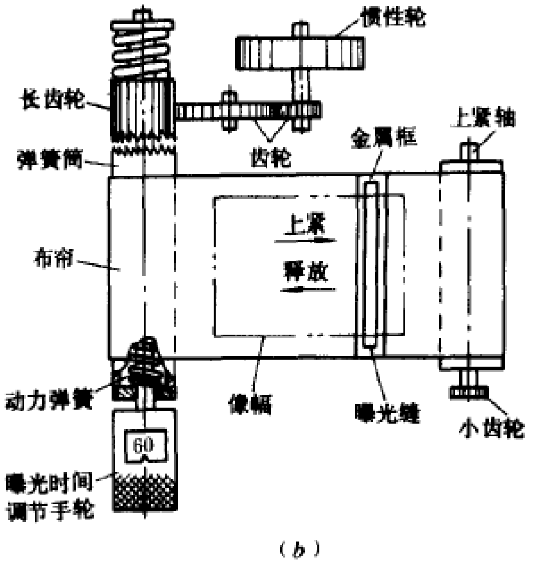


图 5-41　单布帘快门的结构原理图

曝光时间可通过转动滚花手轮来调节。一方面改变动力弹簧的预扭角，另一方面利用轴上的螺旋使长齿轮沿轴向移动，接入或脱开由齿轮和惯性轮组成的惯性系统，改变弹簧筒的转动惯量。这两种方法都是通过改变帘幕运动的速度来改变曝光时间的，其调节范围有限。而用金属框加固的曝光缝宽度固定，摄影中不能改变。为了满足侦察摄影的曝光范围宽的要求，这种相机配备有两套结构相同、缝宽不同的布帘快门，做成单独的部件，可以在摄影前更换。缝宽为 8mm 的快门可得到 1/150s、1/300s 和 1/400s 三种曝光时间，缝宽为 1.4mm 的快门可得到 1/800s、1/1200s 和 1/1600s 三种曝光时间。每种快门的各档曝光时间均用上述的改变弹簧预扭

角和弹簧筒转动惯量的方法得到。

图 5-42 是另一种用于航空侦察相机中的单帘快门。帘幕由两张不透光的塑料薄膜 9 和 12 组成。薄膜的一端用金属卡条 11 固定在有齿孔的传动带 10 上，另一端则和快门插片槽 13 固定。摄影前可根据所需要的曝光时间，在插片槽内插入具有适当缝宽的插片 14。曝光时间不同，插片上的缝宽也不同。这种可更换插片的结构显然比前一种更换整个快门部件的方法经济得多。

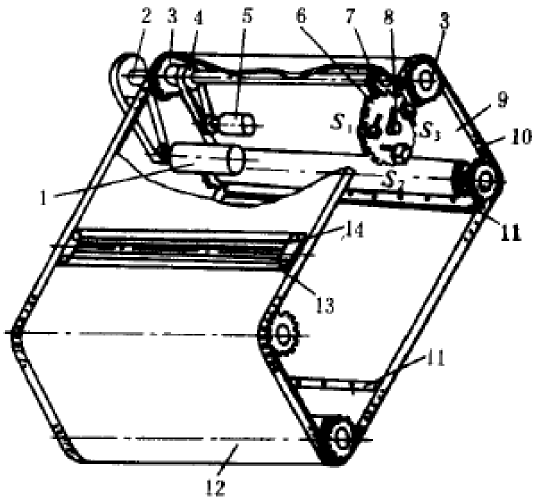


图 5-42　电动单帘快门

这种快门的帘幕不由弹簧和卷轴驱动，而用电机直接驱动。当控制系统发出快门释放信号时，主电机 1 转动，通过皮带传至轴 2 上。轴 2 上装有齿轮 3、7 和带轮 4。齿轮 3 通过传动带 10 使曝光狭缝横越底片，画幅曝光。带轮 4 带动测速发电机 5 送出电机转速的反馈信号，以保持狭缝扫过底片画幅时运动速度恒定。齿轮 7 通过齿轮 6 上的凸块 8，分别带动机械限位器并接通微动开关 S_1，S_2 和 S_3，使电机 1 停止转动和换向。

快门狭缝第一次曝光若为正向运动，则第二次曝光为反向运动，如此往返移动，实现连续摄影。这种快门不需要附加的遮光措施。

单帘快门的曝光时间调节范围有限，故一般只用于航空摄影等一些特殊领域中。

二、双帘快门

双卷帘快门按驱动卷轴的数目可分为三轴式和四轴式两种。

1. 三轴式双帘快门　三轴式双帘快门的典型结构如图 5-43 所示。前帘的一端卷绕在前帘弹簧筒上，另一端通过两根丝带分别卷绕在上带轮和下带轮上。后帘的一端卷绕在与上、下带轮同轴的鼓轮 5 上，另一端则通过两根丝带卷绕在后帘弹簧筒上。曝光缝由前后帘之间的直线边构成。

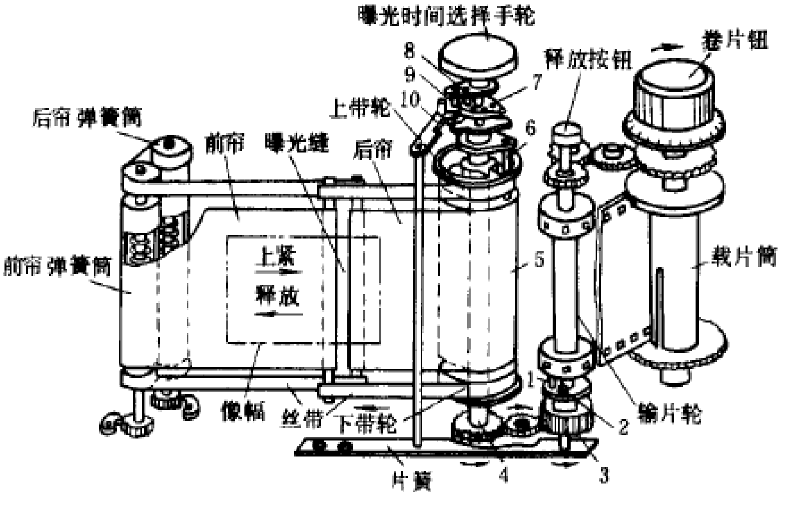


图 5-43　三轴式双帘快门

快门的上紧与卷片同时进行。当顺时针转动卷片钮使输片轮和载片筒旋转时，输片轮下面的拨销离合器 1 和 2 把输片轮的逆时针转动传递给齿轮 3，再经齿轮使上紧轴 4 逆时针转动。固定在上紧轴上的上带轮和下带轮卷绕前帘丝带，上紧前帘动力弹簧。前帘向右移过一小段距

离，在进入底片画幅前先关闭曝光缝，并与后帘形成一定的防漏光重叠量。然后，上带轮的内轮辐才拨动穿过上带轮插入鼓轮 5 的孔内的长拨销 6，推动鼓轮也逆时针转动，卷绕后帘，上紧后帘动力弹簧。这时后帘与前帘一起右移，并保持它们之间的重叠，因此快门上紧时感光材料不会曝光。

快门释放时，按下释放钮，齿轮 3 和离合器的销钉 2 一起下降，与拨销 1 脱离，使快门机构同输片机构的传动链脱开，前帘主弹簧首先释放，前帘开始向左运动。在快门释放钮按下的同时，通过片簧使后帘释放钩 10 也同时下降，钩住上紧轴上的凸块。于是长拨销 6 把鼓轮 5 锁定在上紧位置，后帘不能释放。在前帘释放时，曝光时间选择手轮随上紧轴一起顺时针旋转。当它下面的撞钉 9 转过一定角度，撞开后帘释放钩 10 时，后帘才开始释放。这样，后帘就滞后于前帘一段时间才开始运动。在这一段时间内，前帘不但打开了曝光缝，而且根据曝光时间选择手轮所装定的曝光时间，与后帘之间形成一定宽度的曝光缝，并迅速移过像幅，使底片曝光。

双帘快门的曝光时间取决于后帘开始释放滞后于前帘开始释放的时间，而这个滞后时间的长短又取决于撞钉 9 撞开后帘释放钩所需的转角。转动曝光时间选择手轮装定不同的曝光时间时，手轮下面的销钉 8 将插入调速板 7 的不同孔内，从而使撞钉 9 撞开后帘释放钩 10 所需转角的大小不同。

在撞钉 9 撞开后帘释放钩 10 之前，还可以使用慢门机延长后帘释放的滞后时间，获得较长的曝光时间。慢门机的结构和工作原理与中心快门中的慢门机基本相同。

当手轮转到“B”门位置时，撞钉 9 在前帘释放完毕时都碰不到后帘释放钩上的销钉。只有当摄影者松手，后帘释放钩在片簧的作用下上升，脱开上紧轴上的凸块时，后帘才能释放。这样，快门的曝光时间就完全由摄影者来控制了。

2. 四轴式双帘快门 图 5-44 是四轴式双帘快门的结构示意图。由图可见，四轴式结构与三轴式结构的主要区别是把前帘和后帘的上紧轴分开。这样既可以简化上紧轴的结构，又可以减小上紧轴的直径和转动惯量，也更适合于单镜头反光照相机安装取景反光镜的空间位置需要。

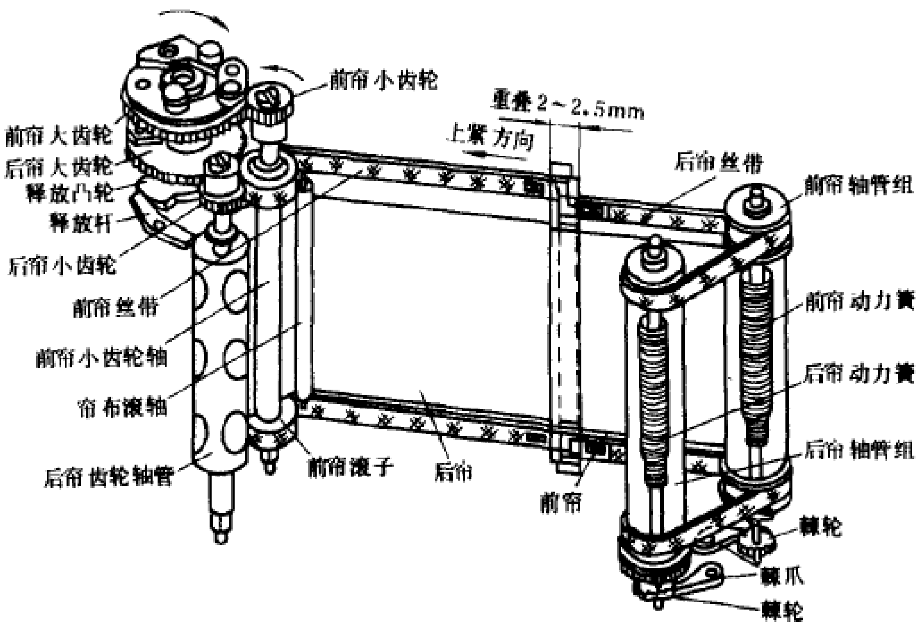


图 5-44　四轴式双帘快门

上紧快门时，卷片机构通过齿轮传动链，使前、后帘大齿轮同时顺时针方向旋转，分别经前、后帘小齿轮使前帘滚子卷绕前帘丝带，上紧前帘动力簧；后帘齿轮轴管卷绕后帘布，上紧后

帘动力簧。在快门上紧时，前后帘之间也保持一定的防漏光重叠量。前、后帘弹簧轴下面的棘轮、棘爪单向机构用于调节动力弹簧的预扭角。快门上紧完毕时，释放杆顶住释放凸轮，使动力簧保持上紧状态。

快门释放时，按下释放钮，首先使反光镜复位，然后由反光镜联动机构推动释放杆解脱对释放凸轮的锁定，前帘首先释放。后帘滞后于前帘释放的时间则决定于快门的调速机构。

图 5-45 所示为快门高速段(1/125s～1/1000s)的调速机构示意图。在按下快门释放钮使前帘释放的同时，撤杆连接板下降，缝隙钩在轴上扭簧作用下钩住大齿轮凸块，使后帘大齿轮不能反时针旋转，释放后帘。而前帘大齿轮在反时针旋转释放前帘的过程中，齿轮上的高速凸块受到弯钩凸轮下铆钉的撞击而使撞击块左端外甩，撞击缝隙钩调节片头部，推开缝隙钩释放后帘大齿轮。当调速盘在高速段范围内装定不同的曝光时间时，弯钩凸轮下铆钉与高速凸块就有不同的距离，从而改变了高速凸块受铆钉撞击的早晚，也就改变了缝隙钩解脱后帘大齿轮释放后帘的早晚。

快门的慢速段(1s～1/60s)由慢门机(图上未表示)控制。当调速盘在慢速段内装定各档曝光时间时，缝隙钩凸轮均以高弧段与缝隙凸轮偏心靠钉接触，使缝隙钩脱开大齿轮凸块。因此，在快门的慢速段内缝隙钩不起阻止后帘释放的作用。当快门上紧完毕时，固定在慢门长轴上的慢门控制凸块落入后帘大齿轮下面的凸缘缺口内。当按下快门释放钮释放前帘时，后帘大齿轮虽然没有被缝隙钩钩住，但后帘大齿轮的转动受到慢门机的阻尼而延迟了后帘释放的时间。调速盘在慢速段装定不同的曝光时间时，慢门机的扇形齿轮将处于不同的起始位置，卡子也有与卡子轮啮合或脱离啮合两种状态，从而使后帘释放时受到大小不同的阻尼力矩和长短不同的阻尼时间，来得到慢速段各档曝光时间。

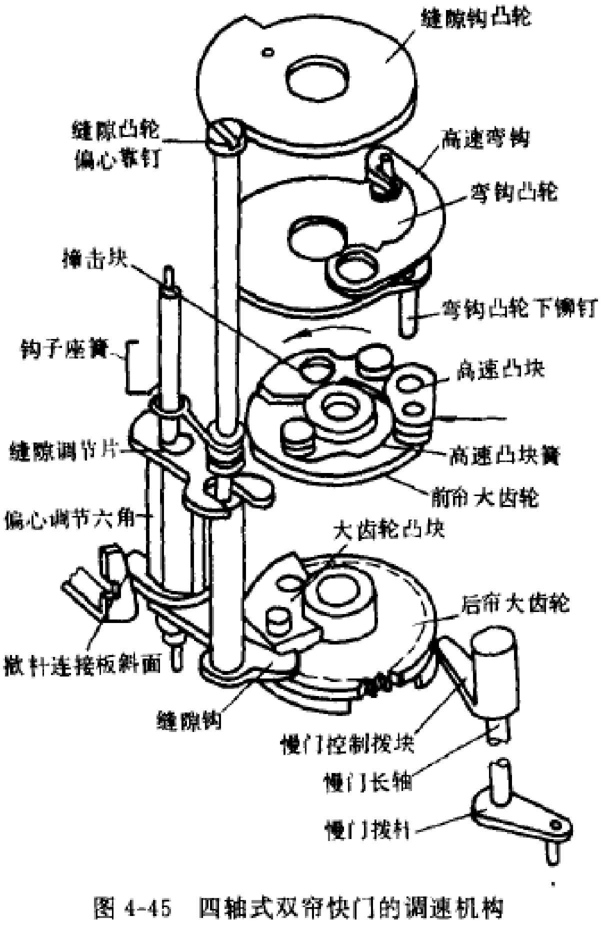


图 4-45 四轴式双帘快门的调速机构

在自动控制曝光量的照相机里，这种结构复杂的机械调速器被体积小、重量轻、易于实现多模式、多功能控制的电子控制线路代替。后帘释放的滞后时间由延时电路根据测光系统提供的信号自动控制释放电磁铁释放后帘的早晚来调节。

三、钢片快门

钢片快门用两组可折叠也可展开的薄钢片构成前后帘幕和运动的曝光缝。其原理如图 5-46 所示。前帘和后帘的钢片分别用两根连杆连结起来。快门上紧时，前帘的叶片展开把底片幅面全部遮住并且彼此只有少量重叠，后帘叶片收拢并几乎全部重叠在一起。

释放快门时，让前帘的连杆绕 O_1 和 O'_1 轴作逆时针方向旋转，前帘的两片钢片向上平移并重叠在一起，露出底片幅面使底片曝光。然后使后帘的连杆绕 O_2 和 O'_2 轴作逆时针方向旋

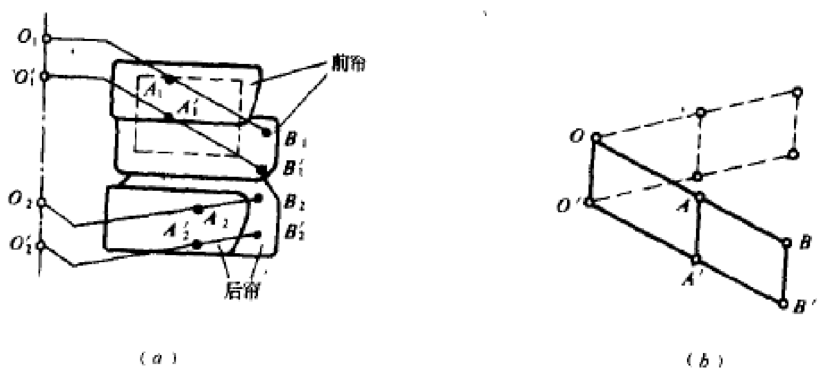


图 5-46　钢片快门的工作原理

转，后帘的两片钢片向上平移并从叠合中分开，最后将底片幅面全部遮住，曝光结束。

重新上紧快门时，只要使四根连杆同时作顺时针旋转，四个钢片同时向下平移，就可保证底片始终为钢片所遮挡。

钢片快门的叶片所以能平行地上下运动并能同时分开或叠合，是利用了平行四边形机构的原理。由图 5-46(*b*)可见，当平行四边形的 OO' 边固定不动时，平行四边形不管怎样变形，其对边 AA' 和 BB' 始终保持与 OO' 平行，因此连接在 AA' 杆和 BB' 杆上的叶片也就始终保持平行。并且还可看到，当平行四边形变形时，AA' 边上下移动的距离要比 BB' 边移动的距离小，这就有可能改变分别连接在它们上面的叶片之间的重叠情形。

早期的钢片快门的前帘和后帘各由两片钢片组成，每片钢片为遮盖像幅所需要的面积较大。后来的改进型式都增加了叶片的数目，以减小叶片的尺寸和快门的高度。目前的钢片快门每个叶片组的叶片数目大多为 4～6 片。

图 5-47 所示为一种钢片快门前帘叶片组和后帘叶片组的结构。这种钢片快门的前帘叶片组有 5 片钢片，后帘叶片组有 4 片钢片。它们分别由前帘叶片拨杆和后帘叶片拨杆。通过连杆拨动。如前所述，连杆和每个叶片都构成一组平行四边形机构。当连杆绕固定轴 O_1、O_1' 或 O_2、O_2' 上下摆动时，各叶片组中的叶片就平行地上下移动。同时由于移动量的不同而彼此重叠或展开。图 5-48 表示前、后帘叶片组在快门基板上，遮盖与开放底片幅面的过程。快门上紧后，如(*a*)所示，前帘叶片展开遮盖像幅，后帘叶片叠合，收拢在像幅下面。快门释放时，前帘向上收拢，后帘滞后于前帘向上展开。(*b*)是像幅被全部打开的状态。(*c*)是快门释放完毕的情形，前帘收拢在像幅的上面，后帘展开遮盖住像幅。快门再次上紧时，前帘叶片组先向下展开，后帘叶片组再一起向下移动并收拢，以保持在快门上紧过程中前后帘之前有足够的防漏光重叠量。

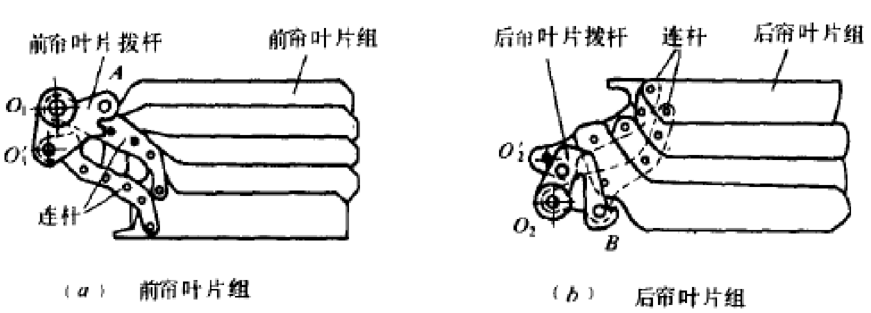
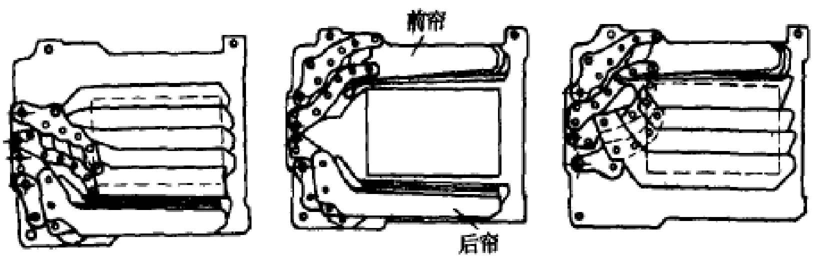


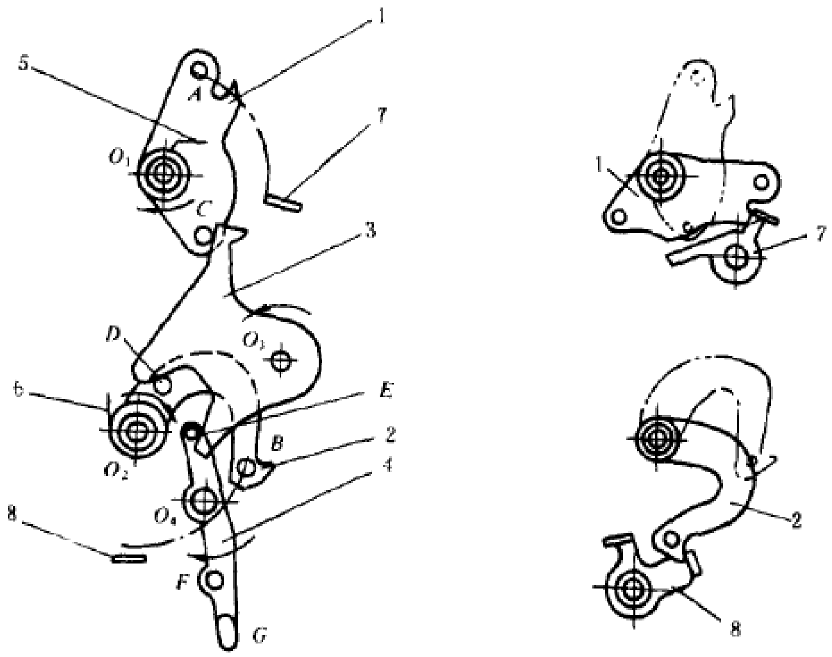
图 5-47　钢片快门叶片组的结构

这种钢片快门有彼此独立的上紧机构和释放机构。上紧机构如图 5-49 所示。在卷片的同时，上弦杠杆 4 顺时针转动，上端的销钉 E 推动传动杠杆 3 逆时针转动。传动杠杆 3 先推动前帘叶片拨杆 1 上的销钉 C，使前帘叶片拨杆逆时针转动，上紧轴上的前帘动力簧(扭簧)，同时



（a）快门上紧后　（b）快门全开时　（c）快门释放完毕

图 5-48　钢片快门的叶片遮盖与开放底片幅面的过程



（a）上紧时　（b）上紧完毕

图 5-49　钢片快门的上紧机构

使前帘叶片向下展开。当前帘叶片与后帘叶片之间形成足够的重叠量时，传动杠杆推动后帘叶片拨杆 2 上的销钉 D，使后帘叶片拨杆顺时针转动，上紧轴上的后帘动力弹簧（扭簧），同时使后帘向下收拢。直到前帘和后帘恢复到图 5-49(a)的情形时，前、后帘叶片拨杆分别被前、后帘释放钩 7 和 8 钩住，如图 5-49(b)所示。

快门的释放控制机构如图 5-50 所示，由带齿凸轮 9、齿轮 10、制动杆 11 等组成。带齿凸轮 9 和齿轮 10 都由高强度尼龙注塑而成，9 的轮辋的一部分做成凸轮轮廓，一部分做成齿轮的齿，与齿轮 10 啮合。释放机构在凸轮 9 的轴上有自己的动力弹簧 12。在上紧前帘和后帘的动力弹簧时，上弦杠杆 4 上的销钉 F（图 5-49）推动齿轮 10 顺时针转动，并通过局部齿的传动使凸轮 9 逆时针转动，把轴上的动力簧 12 上紧。当快门上紧完毕时，制动杆 11 将凸轮 9 锁定，以保持轴上扭簧的上紧状态。

快门释放时，制动杆 11 被顺时针拨动，解脱对凸轮 9 的锁定，扭簧 12 释放。凸轮 9 顺时针旋转，其工作面 I 推动三角连杆 15 绕轴 M 逆时针转动。三角连杆上的销钉 N 推动摆杆 16，并通过摆杆上的销钉 H 使前帘释放钩 7 顺时针转动，解脱对前帘叶片拨杆的锁定，前帘开始释放。

在凸轮 9 转过一定的角度时，齿轮 10 的曲线槽工作面Ⅱ推动后帘释放钩 8 的突起，使释放钩释放后帘叶片组。这种由独立的释放机构直接控制前帘和后帘的释放，比前述双卷帘快门中用前帘释放运动的冲击力来释放后帘的方法，能获得比较准确、稳定的滞后时间，提高了快门高速段工作的可靠性。

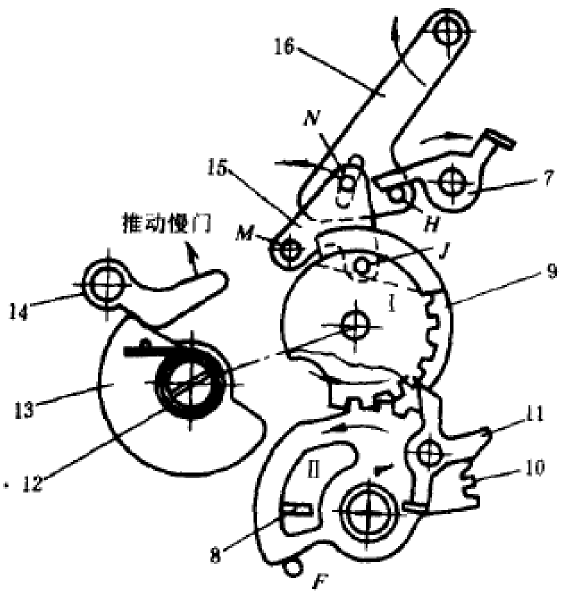


图 5-50　钢片快门的释放控制机构

快门高速段的调速是由调速盘（图中未表示）改变轴 M 的位置，从而改变凸轮 9 通过三角连杆 15 和摆杆 16 推开前帘释放钩 7 的早晚，从而改变由前帘释放到后帘释放之间的时间间隔。

快门的中、低速段也由慢门机延时。当调速盘置于中、低速段各档曝光时间位置时，在齿轮 10 的曲线槽工作面Ⅱ推开后帘释放钩 8 释放后帘之前，与凸轮 9 同轴的延时凸轮 13 推动慢门拨杆 14，使慢门机工作，从而延长了后帘滞后于前帘释放的时间。

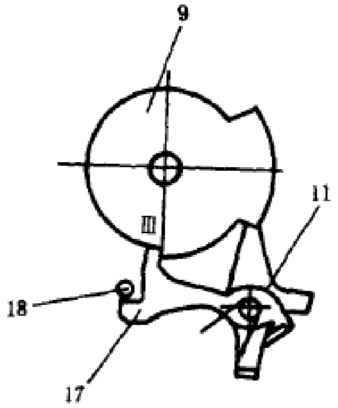


图 5-51　钢片快门的自拍控制机构

若要以自拍方式摄影，在用自拍钮上紧自拍机时，自拍锁钩 17 将凸轮 9 的台阶Ⅲ钩住（见图 5-51）。这时即使制动杠杆 11 解脱对凸轮 9 的锁定，凸轮 9 也不会释放。只有当自拍机达到所需的延迟时间时，自拍机的控制杆 18 才会推动自拍锁钩 17 解脱凸轮 9，使释放控制机构开始工作，先后释放前帘和后帘。

上面所说的钢片快门还是机械控制曝光时间的钢片快门。但是只要把机械释放控制机构改为自动曝光控制电路控制的电磁式释放控制机构，就很容易把机械钢片快门改型为电子钢片快门。

图 5-52 是这种电子钢片快门的释放控制机构示意图。快门上紧时，控制凸轮 3 上的曲面凸缘 4 推动衔铁杠杆 10 的右臂，使衔铁 11 与电磁铁 1 接触，同时上紧杠杆轴上的弹簧。这时凸轮 3 上的凸缘 9 的位置是使开关 SK 接通，为电子快门的计时控制作好准备。

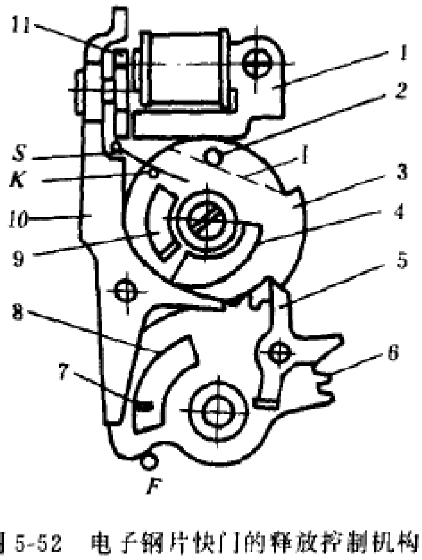


图 5-52　电子钢片快门的释放控制机构

快门释放时，按下快门释放钮，电磁铁被接通，吸住衔铁 11。接着制动杠杆 5 被推动，解脱对凸轮 3 的锁定，凸轮轴上的扭簧（该扭簧在快门上紧时已被上紧）释放，凸轮顺时针转动。这时虽然凸缘 4 的曲面离开衔铁杠杆 10 的右臂，衔铁杠杆也不会在轴上扭簧的作用下逆时针转动，因为衔铁 11 被通电的电磁铁 1 吸住。凸轮 3 的旋转，一方面以工作面 I 推动与图 5-50 中类似的传动机构释放前帘，另一方面以凸缘 9 断开开关 SK。自动曝光控制电路开始工作，经过适当的延时使电磁铁断电。衔铁杠杆在轴上扭簧的作用下逆时针旋转，其下端推动后帘释放钩 7 使后帘开始释放。后帘滞后于前帘释放的时间完全由自动曝光控制电路来控制和调节。齿轮 6 上的弧形槽 8 已取消了短半

半径弧段，所以不起推动后帘释放钩的作用。

5-5.2　帘幕快门的特性

帘幕快门的帘幕或钢片快门的叶片是在距离底片平面很近的平行平面内运动的。一方面，由帘幕构成的曝光缝所切割的光束口径很小，另一方面，像面上各点不是同时曝光，而是沿曝光缝运动方向顺序曝光。帘幕快门的上述特点是我们讨论它的通光特性的出发点，也决定了它与中心快门通光特性的主要区别。

一、单帘快门的特性

一般来说，构成曝光缝的帘幕在快门曝光过程中的运动速度是变化的。但是单帘快门的曝光缝较窄，而且缝宽在曝光过程中固定不变，我们在讨论感光层上某一像点的曝光特性时，可以近似认为在该点的曝光时间内帘速不变。这就使单帘快门特性的讨论简化。

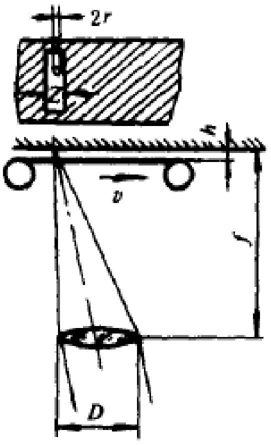


图 5-53　成像光束通过单帘快门的曝光情况

1. 实际曝光时间 $t_{\text{实}}$　由图 5-53 可以写出单帘快门各个工作阶段的持续时间和实际曝光时间如下：

打开时间　$t_{\text{开}}=2r/v$

全开时间　$t_{\text{全}}=(z-2r)/uv$

关闭时间　$t_{\text{关}}=2r/v$

则　$t_{\text{实}}=t_{\text{开}}+t_{\text{实}}+t_{\text{关}}=(z+2r)/v$

又因　$2r=hD/f'=h/F$，故可得

$$t_{\text{实}}=\frac{z+hD/f'}{v}=\frac{z+h/F}{v} \tag{5-84}$$

可见，单帘幕快门的实际曝光时间与帘幕离开焦平面的距离 h，缝宽 z 及相对孔径 D/f' 成比例，与光圈数 F 和帘幕运动速度 v 成反比。因为 h 很小，一般只有几毫米，狭缝切割的光束口径很小，因此帘幕快门可以获得比中心快门短得多的曝光时间。

例如，设 $h=5\text{mm}$，$D/f'=1:6.3$，则 $2r\approx0.8\text{mm}$。当 $z=1.4\text{mm}$，$v=3.5\text{m/s}$ 时，$t_{\text{实}}\approx1/1600\text{s}$。

摄影时若改变物镜的光圈数，则曝光时间也会随之改变。光圈数愈大（光阑孔径愈小），曝光时间也愈短。如上例中，若把光圈数从 $F6.3$ 改变到 $F45$，实际曝光时间将缩短到 $t_{\text{实}}\approx1/2300\text{s}$。

帘幕到焦平面的距离在相机设计制造好后已成定值，摄影中可用改变缝宽和帘速的方法调节曝光时间。单帘快门在结构上不如双帘快门改变缝宽方便，所以调速范围不如双帘快门宽。

2. 通光效率 η　对于单个像点的曝光过程来说，帘幕快门的打开阶段和关闭阶段是对称的（图 5-54）。由前面的（5-12）式可知，这时快门效率 η 主要取决于打开阶段的效率 $\eta_{\text{开}}$ 及打开阶段的时间在全曝光时间内所占的比例 $t_{\text{开}}/t_{\text{实}}$。我们从分析快门的打开过程中，就可以很简单地画出打开阶段的特性曲线（关闭阶段相同）。在图 5-55 的快门通光特性曲线中，曲线上的一个点对应某 x 值时帘幕打开光孔（在快门平面内）的面积 S（见图 5-54）。

由图可以看出：

当 $x=r$ 时，曲线上对应 G 点，光锥截面正好打开一半，所以 $S=0.5\pi r^2$；当 $x=r/2$ 及 $3r/2$ 时，曲线上分别对应 A 和 B 点，A 点高度不到 $\pi r^2/4$，B 点高度大于 $3\pi r^2/4$，故曲线 OAG 向下凹，曲线 GBH 向上凸。

由图 5-54 可写出弓形面积：$S=r^2\alpha-r^2\sin\alpha\cos\alpha$。

因 $x=r(1-\cos\alpha)$，则 $\mathrm{d}x=r\sin\alpha\mathrm{d}\alpha$，故

$$\eta_{开}=\frac{面积\,OGHFO}{面积\,ONHFO}=\frac{1}{2r\pi r^2}\int_0^{2r}S\mathrm{d}x$$

$$=\frac{1}{2\pi r^3}\int_0^{\pi}(r^2\alpha-r^2\sin\alpha\cos\alpha)r\sin\mathrm{d}\alpha$$

$$=0.5 \tag{5-85}$$

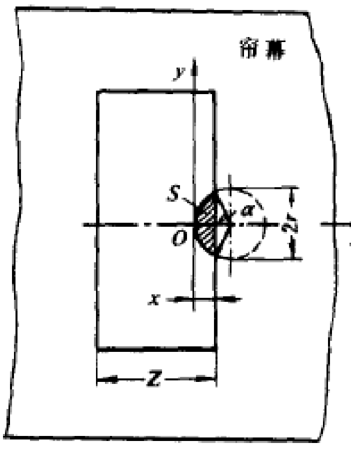


图 5-54 曝光缝切割光束截面的过程

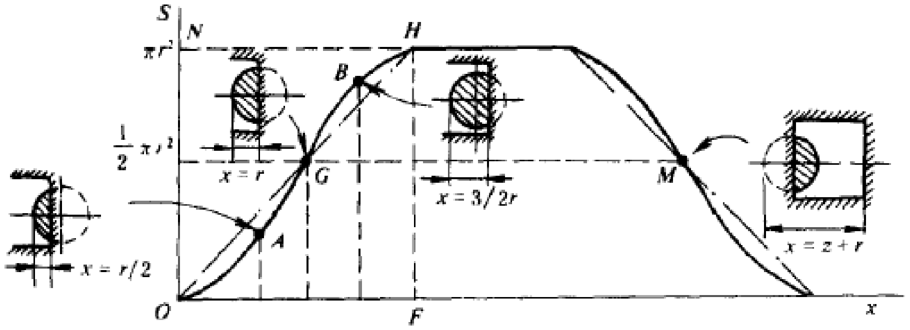


图 5-55 帘幕快门的通光特性曲线

这就是说，曲线 $OAGBH$ 下面所包容的面积等于三角形 OHF 的面积。

将(5-85)式代入(5-12)式，得到帘幕快门的通光效率

$$\eta=1-2(1-\eta_{开})\frac{t_{开}}{t_{实}}=1-2(1-0.5)\frac{2r/v}{(z+2r)/v}$$

$$=\frac{1}{1+\dfrac{2r}{z}}=\frac{1}{1+\dfrac{h}{z}\dfrac{D}{f'}}=\frac{1}{1+\dfrac{h}{zF}} \tag{5-86}$$

(5-86)式表明，帘幕快门的通光效率与帘幕到焦平面的距离 h，曝光狭缝宽度 z 以及物镜的相对孔径 D/f' 或光圈数 F 有关。减小 h，增大 z 和 F，都可以提高快门效率。由于帘幕紧靠焦平面，光锥截面直径 $2r$ 比狭缝宽度小得多，所以帘幕快门的通光效率可以很高。例如设 $h=$ 5mm，$z=8$mm，$F=16$，则 $\eta=0.96$。这也是帘幕快门的优点之一。

3. 有效曝光时间 $t_{效}$ 由(5-84)式和(5-86)式可得

$$t_{效}=\eta t_{实}=\frac{1}{1+h/zF}\,\frac{z(1+h/zF)}{v}=\frac{z}{v} \tag{5-87}$$

可见，单帘幕快门的有效曝光时间仅与帘幕运动速度以及曝光狭缝的宽度有关，而与物镜通光孔径的大小无关。

由图 5-55 也可以直观地看出，帘幕快门的有效曝光时间与从前帘切割光锥中心到后帘切割光锥中心所需要的时间相等。

上面所讨论的是单帘幕快门对于像面上某一像点的曝光特性。对于像面上不同的像点来说，帘幕运动的速度就不能看成是不变的了。由于帘幕快门使像面上各点沿曝光缝运动方向顺序曝光，因此帘速的变化就会引起像点的曝光量沿帘幕运动方向分布不均匀。这是帘幕快门(包括单帘快门和双帘快门)的缺点。

讨论帘幕速度的变化需要对帘幕及其驱动机构的动力学进行分析，建立帘幕的运动方程。单帘快门可以看成双帘快门在前帘和后帘的运动速度相等时的特殊情形。因此，我们在讨论双帘快门特性时再进行分析。

二、双帘快门的特性

双帘快门特性的分析以卷轴式双帘快门为例。分析方法适用于钢片快门，所不同的只是归化质量的计算要针对不同的驱动机构来做。

图 5-56 为双帘快门的示意图。图中：h 为前、后帘到底片平面的平均距离；S_0 为由前帘工作边起始点 O 到某像点 A 的距离；S 为在帘幕平面内，由 O 点到像点 A 光束截面中心点的距离。一般因 h 较小，故可近似认为 $S\approx S_0$。

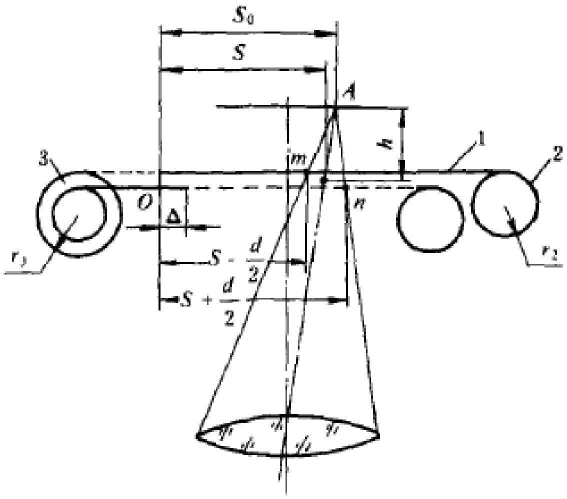


图 5-56 双帘快门运动分析图

1. 前帘的运动方程 根据牛顿第二定律，前帘的运动与所受力之间有如下的关系

$$m_{归}\ddot{S}_1 = P_1 - F_1 \qquad (5\text{-}88)$$

式中 $m_{归}$ 为前帘运动部件归化到前帘上的归化质量；$\ddot{S}_1$ 为前帘直线运动的加速度；P_1 为作用在前帘上的弹簧力，$P_1=M_{前}/r_2$；F_1 为作用在前帘上的归化摩擦阻力及前帘碰撞后帘释放钩的碰撞阻力。

由图 5-56，前帘 1、前帘弹簧筒 2、前帘带轮 3 运动的总动能 T

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2 + \frac{1}{2}J_3\omega_3^2 \\ &= \frac{1}{2}\left[m_1 + \left(\frac{\omega_2}{v_1}\right)^2 J_2 + \left(\frac{\omega_3}{v_1}\right)^2 J_3\right]v_1^2 \\ &= \frac{1}{2}m_{归}v_1^2 \end{aligned}$$

因此 $m_{归}=m_1+J_2/r_2^2+J_3/r_3^2$。

快门结构不大时，$m_{归}$ 的变化甚小，$m_{归}$ 可近似认为是一个常量。

由图 5-57 的弹簧特性曲线可以写出

$$M_{前} = M_{前\max} - Q\varphi_2$$

式中 $M_{前\max}$为弹簧全部上紧时的最大力矩；Q 为弹簧刚度，$Q=M_{\max}/\varphi_m$；φ_2 为前帘弹簧筒 2 的现时转角，$\varphi_2=S_1/r_2$。

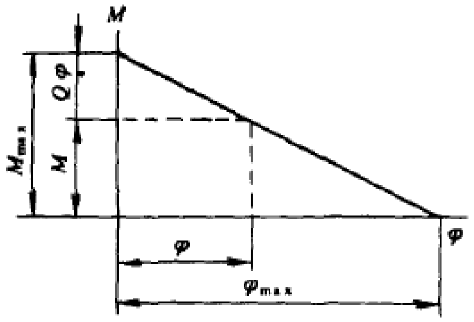


图 5-57 动力弹簧的特性

我们将 F_1 略去不计，则(5-88)式可写成

$$m_{归}\ddot{S}_1 = \frac{M_{前\max}}{r_2} - \frac{Q}{r_2^2}S_1$$

或

$$\ddot{S}_1 + \frac{Q}{r_2^2 m_{归}}S_1 - \frac{M_{前\max}}{r_2 m_{归}} = 0 \qquad (5\text{-}89)$$

(5-89)式就是前帘的运动微分方程。解此方程，即可求得前帘的位移、速度和时间 t 的关

系。

令 $Q/r_2^2 m_{臼}=\alpha_1^2$，$M_{前max}/r_2 m_{臼}=A_1$，则(5-89)式可写成

$$\ddot{S}_1 + \alpha_1^2 S_1 - A_1 = 0 \tag{5-90}$$

这是一个非齐次线性二阶微分方程，它的一个特解是

$$S_1 = A_1/\alpha_1^2$$

然后再求对应的齐次微分方程 $\ddot{S}_1+\alpha_1^2 S_1=0$ 的通解。其解为

$$S_1 = a\sin(\alpha_1 t + b)$$

式中 a，b 为积分常数。故(5-90)式的解为

$$S_1 = a\sin(\alpha_1 t + b) + A_1/\alpha_1^2,$$

$$\dot{S}_1 = a\alpha_1\cos(\alpha_1 t + b) \tag{5-91}$$

根据初始条件确定 a 和 b：快门上紧时，前帘工作边处于 S_1 的坐标原点，其速度等于零(参看图 5-56)，即

$$t = 0 \text{ 时}, \quad S_1 = 0, \quad \dot{S}_1 = 0$$

代入(5-91)式得

$$a\sin b + A_1/\alpha_1^2 = 0$$

$$a\alpha_2\cos b = 0$$

由上两式联立求解，得

$$a = -A_1/\alpha_1^2,\ b = \pi/2$$

代入(5-91)式，并令 $S_{1max}=A_1/\alpha_1^2$，则(5-91)式可写成

$$S_1 = S_{1max}(1 - \cos\alpha_1 t) \tag{5-92}$$

$$v_1 = \dot{S}_1 = \alpha_1 S_{1max}\sin\alpha_1 t \tag{5-93}$$

(5-92)式即前帘的运动方程。式中 S_{1max} 的意义是：前帘由弹簧上紧至弹簧完全松开所对应的最大位移。

2. 后帘的运动方程 前帘运动了时间 t_c 后释放后帘，在快门上紧时，前、后帘之间有一重叠量 Δ。即初始条件：$t=t_c$ 时，$S_2=\Delta$，$\dot{S}_2=0$。

同样，我们可以求出后帘运动方程为

$$S_2 = S_{2max}[1 - \cos\alpha_2(t - t_c)] + \Delta \tag{5-94}$$

$$v_2 = \dot{S}_2 = \alpha_2 S_{2max}\sin\alpha_2(t - t_c) \tag{5-95}$$

3. 底片上任意点 A 的实际曝光时间 $t_{实}$ A 点的曝光时间等于前帘工作边运动到 m 点的时间 t_1(图 5-56)至后帘工作边运动到 n 点的时间 t_2 之间的间隔。A 点坐标为 S_0，近似用 S 来表示，m、n 点的坐标分别为 $(S-d/2)$ 及 $(S+d/2)$。用 $S_1=S-d/2$ 及 $S_1=S+d/2$ 代入(5-92)式和(5-94)式得

$$S - \frac{d}{2} = S_{1max}(1 - \cos\alpha_1 t_1)$$

$$S + \frac{d}{2} - \Delta = S_{2max}[1 - \cos\alpha_2(t_2 - t_c)]$$

因此

$$t_{实} = t_2 - t_1 = t_c + \frac{1}{\alpha_2}\cos^{-1}\left(1 - \frac{S + d/2 - \Delta}{S_{2max}}\right) - \frac{1}{\alpha_1}\cos^{-1}\left(1 - \frac{S - d/2}{S_{1max}}\right) \tag{5-96}$$

4. 有效曝光时间 $t_{效}$ 前面我们已经说过，帘幕快门的有效曝光时间等于从前帘工作边切割光锥中心至后帘工作边切割光锥中心所需要的时间间隔，故可直接写出：

$$t_{效} = t_c + \frac{1}{\alpha_2}\cos^{-1}\left(1 - \frac{S-\Delta}{S_{2\max}}\right) - \frac{1}{\alpha_1}\cos^{-1}\left(1 - \frac{S}{S_{1\max}}\right)$$

$$= t_c + \frac{1}{\alpha_1}\left[\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\cos^{-1}\left(1 - \frac{S-\Delta}{S_{2\max}}\right) - \cos^{-1}\left(1 - \frac{S}{S_{1\max}}\right)\right] \tag{5-97}$$

5. 像幅曝光均匀性的讨论 (5-97)式说明，底片画幅上任意点的有效曝光时间是由两部分组成的：一部分是 t_c，它的意义是后帘开始运动滞后于前帘开始运动的时间。t_c 不影响整个画幅曝光均匀性。另一部分

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha_1}\left[\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\cos^{-1}\left(1 - \frac{S-\Delta}{S_{2\max}}\right) - \cos^{-1}\left(1 - \frac{S}{S_{1\max}}\right)\right] \tag{5-98}$$

是 S 的函数，直接影响到底片画幅的曝光均匀性，因此我们只需讨论这一部分。

由(5-98)式可以看出，如果满足 $\alpha_1 = \alpha_2$，$S_{1\max} = S_{2\max}$ 以及 $\Delta = 0$，那么 $\Delta t = 0$，整个画幅上的曝光就均匀了。$t_{效} = t_c$，它与象点的位置无关。

但大多数双帘快门在曝光开始时，为了防止漏光，都保持一定的重叠量，即 $\Delta \neq 0$。在这种情况下，需要选择不同的 α_1，α_2，$S_{1\max}$，$S_{2\max}$ 的组合，来调整前、后帘的运动曲线。

α_1 和 α_2 的比值变化对曝光均匀性的影响是比较大的，一般可取 $\alpha_1 = (0.95 \sim 1.05)\alpha_2$。$S_{1\max}$ 和 $S_{2\max}$ 的选取应保证弹簧工作在其特性曲线的直线段。一般小相机中，画幅不大，前、后帘的重叠量 Δ 也不大，改变 $S_{1\max}$ 和 $S_{2\max}$ 即可使画幅内曝光均匀性满足要求，但在幅面较大的相机中，则要首先改变 α_1 和 α_2 的比值，再适当调节 $S_{1\max}$ 和 $S_{2\max}$ 来使画幅曝光均匀。

由(5-98)式还可以看到，当 α_1/α_2 值确定后，增大 α_1 的数值，即增大前、后帘的速度，可以使 Δt 减小，从而能改善曝光均匀性。但 α 值的增大受到结构尺寸及快门承受冲击的限制。

钢片快门的叶片沿底片画幅的短边运动，缩小了幅面上曝光时间的差别，因而曝光均匀性也比横走式卷帘快门有所改善。但卷帘快门可以增加帘幕的起跑段来改善曝光均匀性，还可以增加跑出段来减小制动冲击，这是卷帘快门比较钢片快门的优点。

对于单帘快门来说，可认为 $t_c = 0$，$\Delta = z$(单帘快门的缝宽)，$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$，$S_{1\max} = S_{2\max} = S_{\max}$，代入(5-96)式和(5-97)式可得单帘快门的实际曝光时间与有效曝光时间随狭缝位置 S 变化的函数关系式

$$t_{实} = \frac{1}{\alpha}\left[\cos^{-1}\left(1 - \frac{S + \frac{d}{2} - Z}{S_{\max}}\right) - \cos^{-1}\left(1 - \frac{S - \frac{d}{2}}{S_{\max}}\right)\right] \tag{5-99}$$

$$t_{效} = \frac{1}{\alpha}\left[\cos^{-1}\left(1 - \frac{S - Z}{S_{\max}}\right) - \cos^{-1}\left(1 - \frac{S}{S_{\max}}\right)\right] \tag{5-100}$$

同理，增大 α，减小缝宽 z，以及增加帘幕的起跑段，也可以改善单帘幕快门曝光的均匀性。

三、像变形

摄影影像变形，或简称像变形，是指由于某种原因使摄影影像与被摄物之间的几何相似性受到破坏的现象。产生像变形的原因有摄影物镜的像差、摄影方法和曝光方式等。由于物镜光学系统在对不同高度的物体成像时有不同的垂轴放大率而产生的光学像与物之间的几何不相似性，是光学系统的一种像差，称为畸变。在倾斜摄影、缝隙摄影和全景摄影中，由于摄影影像各部分比例尺不同，投影方式不同，像移和像移补偿等原因所产生的像变形已在 § 2-4 中讨论

了。这里仅讨论由帘幕快门的顺序曝光方式引起的像变形。

我们以航空摄影的情形为例来分析像变形产生的原因和像变形量的计算方法以及像变形的方向。在图 5-58 中，设摄影时飞机以恒速 W 向前飞行，在某一瞬间，相机物镜中心位于 O 点，这时若底片各点同时曝光，则地物 A、B 两点在底片上应成像在 a、b 两点，但采用帘幕快门时，宽度为 Z 的狭缝此时位于 K 点，只使 a 点曝光。经过 t_s 时间后，物镜中心移到 O' 点，同时狭缝以速度 v 移到 K' 点，此时地物 B 点成像在 b' 点。故由于帘幕快门顺序曝光的特点，以致 A、B 两点曝光的先后时间差 t_s。在 t_s 这段时间内，飞机向前运动了一段距离 Wt_s，地物 B 点的影像也在同一方向上相对于底片由 b 点位移到 b' 点，结果底片上获得的地物长 AB 的实际影像长为 ab'，显然 $ab' \neq ab$，差值 $ab - ab' = \Delta l$ 称为绝对像变形量。

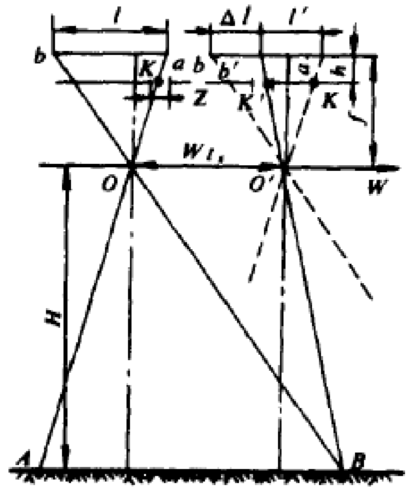


图 5-58 帘幕快门产生像变形的原因

由图 5-58 可以写出

$$\frac{\Delta l}{Wt_s} = \frac{f'}{H}$$

由 $t_s = \overline{KK'}/v$ 及 $\overline{KK'}/l' = (f' - h)/f' = 1 - h/f'$，可得 $t_s = l'(1 - h/f')/v$。又由(5-84)式有

$$v = \frac{z + h/F}{t_{实}}$$

故相对像变形量可由下式计算

$$\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{\Delta l}{l'} = \frac{Wf'}{vH}\left(1 - \frac{h}{f'}\right) = W\frac{f'}{H}\frac{t_{实}(1 - h/f')}{z + h/F} \tag{5-101}$$

事实上，帘幕与底片之间的距离 h 比物镜的焦距 f' 小得多，所以式中的 h/f' 可以忽略不计，又由(2-6)式有影像相对于底片的移动速度，即像移速度

$$v_{像} = W\frac{f'}{H}$$

因此相对像变形量也可以近似表示为

$$\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{v_{像}}{v} \tag{5-102}$$

或绝对像变形量

$$\Delta l \approx \frac{v_{像}}{v}l \tag{5-103}$$

由(5-103)式可见，绝对像变形量与像移速度和影像在狭缝运动方向上的长度成正比，与帘幕运动的速度成反比。因此，提高帘速可以减小像变形量。在航空摄影的情况下，当速高比 W/H 较大，物镜焦距又较长时，像移速度往往较高，加上航空底片的像幅一般都比较大，像变形量就比较大。在地面摄影用的普通照相机中，纵走幅面的钢片快门显然能比横走幅面的卷帘快门减小最大绝对像变形量。

由(5-103)式还可以看出，当 $v_{像} = 0$ 时，$\Delta l = 0$，说明像移是产生像变形的必要条件，因为如果没有像移，也就是被摄物与底片之间没有相对运动，即使采用帘幕快门使底片顺序曝光，也不会产生像变形。然而，像移不是产生像变形的充分条件，因为如果像幅上各点同时曝光（例如

采用中心快门)，那么即使有像移也不会产生像变形。总之，产生像变形的充要条件是既有像移又有顺序曝光。

像变形的方向取决于飞机的飞行方向和帘幕的运动方向，当帘幕的运动方向与飞行方向相同时，像伸长；相反时，像缩短；垂直时，像产生扭曲，即产生角变形(图 5-59)。帘幕快门的这一严重缺点使影像失真，因而在精确的测量制图航空相机中不能用帘幕快门。

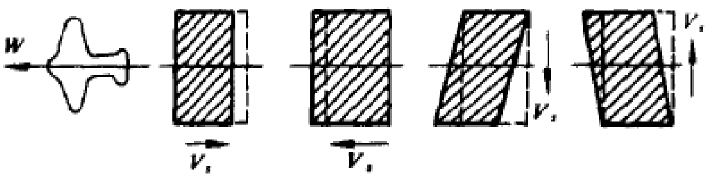


图 5-59 像变形的方向与飞行方向 W 和帘速方向 V_s 的关系

上面对于像变形的分析和像变形量的计算式同样适用于地面摄影中拍摄运动物体的情形。

第六章　曝光量控制

摄影就是通过照相机将构成被摄景物光学像的光通量投射到感光材料上使感光材料曝光。正确的曝光量控制能使感光材料上的光学密度最好地复现被摄景物的细节，得到一张高质量的照片。下面讨论，为了使感光材料得到正确的曝光量，各曝光参数应有什么样的关系以及摄影机是怎样进行曝光量控制的。

§6-1　曝光参数方程

一、曝光参数方程式

曝光参数方程式就是用数学式来描述感光材料得到正确曝光量时，各曝光参数之间的关系。那么，决定曝光量的曝光参数又有哪一些呢？

根据第一章(1-1)式所给的定义，像面的曝光量为

$$H = Et$$

式中 E 为像面照度(lx)；t 为有效曝光时间(s)。

同时，从第三章的(3-5)式和(3-13)式，可以写出像面上任意像点的照度为

$$E_\beta = \frac{\pi}{4}L_\beta \tau \beta_p^2 \left(\frac{p-f'}{p}\right)^2 cK_v\cos^4\beta\left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tag{6-1}$$

这个式子和(3-5)式及(3-13)式相比，多了一个眩光系数 c，这是考虑了摄影机内光线的杂乱散射。这种有害的杂散光的来源是透镜表面的散射和各个金属表面涂黑不佳造成的散射。它的影响与大气湮雾相似，也是降低了像的对比。杂散光落到感光材料表面上，等于增加了像面的照度。

如将(6-1)式代入前面曝光量的公式，显然，像面上各点的曝光量是极不相同的，而且影响的因素很多。如果全部(除少数结构常数外)作为可变参数来考虑，势必使问题过于复杂，以致无法得出有用的结果。因此，在实际照相机的设计计算工作中，(6-1)式中的各个因子通常采用引入平均值或取典型值的处理方法。例如：用被摄景物的平均亮度 L 来代替各点不同的亮度 L_β；光瞳放大率 β_p 一般取为等于 1。其余除相对孔径以外的因子我们合起来用一个系数 q 来表示

$$q = \frac{\pi}{4}\left(\frac{p-f'}{p}\right)^2 \tau cK_v\cos^4\beta \tag{6-2}$$

并把它叫做摄影成像系统的特性系数，以区别于后面我们要讨论的与感光材料有关的另一个特性系数。

q 值的大小，对于不同的摄影机、不同的摄影距离以及不同的像点应该是有差别的，但为了使问题简化，目前，对于一般摄影的普通照相机采用以下这样一组典型值：

物距 $p=80$ 倍焦距 f'(相当于 $f=50$mm 时，$p=4$m)

像场角 $\beta=12°$(即以该处的照度作为像面平均照度)

渐晕系数 $K_v=1.0$(与 $\beta=12°$相应处的渐晕系数)

物镜透过率 $\tau=0.90$

眩光系数 $c=1.03$

这样得到 q 的典型值为 $q=0.65$。

这样，就可以把像面的平均照度表示成

$$E = qL\frac{1}{F^2} \tag{6-3}$$

像面的平均曝光量可以写成

$$H_F = qL\frac{t}{F^2} \tag{6-4}$$

符号 H 的脚标 F 表示这是摄影成像系统“提供”给感光材料的平均曝光量。

现在要讨论的问题是：各种感光材料“需要的”平均曝光量 H_g（有的资料中把 H_g 叫做正确曝光量）是多大？

“正确曝光量”对每一个人和拍摄每一种景物是不一样的。每一个人都把自己偏爱的曝光量看成“正确曝光量”。因此，在建立曝光参数方程中，只能把拍摄普通的平均景物、大多数人认为优质的照片的平均曝光量作为感光材料的合适曝光量。

从第一章§1-7知道，美国ASA制黑白负片感光度的计算公式为

$$S = \frac{0.8}{H_A}$$

式中 H_A 为确定感光度的基准曝光量。

根据对大量的景物特性和黑白负片特性的测试与分析以及对大量的实拍照片的评定、分析和统计后得出，黑白负片的合适曝光量 H_g 为其基准曝光量 H_A 的10倍，即

$$H_g = 10H_A \quad 或 \quad H_g = 10\times\frac{0.8}{S} = \frac{8}{S} \tag{6-5}$$

当使用DIN制感光度 S_{DIN} 时，可将它折合成ASA制的感光度，然后代入上式。各种感光制之间并无严格的数学换算关系，因此这种换算可以利用如表1-5那样的表格，或者近似地用下面这个关系式

$$S = 10^{(S_{DIN}-1)/10} \tag{6-6}$$

例如 $S_{DIN}=21$ 时，代入上式得到 $S=100$。

由于彩色负片和彩色反转片它们本身的特性以及感光度的表示方法不一样，它们的合适曝光量最后可以表示成

$$H_g = 10/S \tag{6-7}$$

从(6-5)和(6-7)式可以看出，对同样感光度标号的感光材料，黑白负片与彩色负片和彩色反转片所要求的合适曝光量是不一样的。例如 $S=100$ 的黑白负片要求合适曝光量 $H_g=0.08$lx·s，而彩色负片和彩色反转片要求 $H_g=0.1$ lx·s。(6-5)和(6-7)两式可以合并写成如下形式

$$H_g = p/S \tag{6-8}$$

式中 p 是一个与感光材料有关的特性系数，有的资料上把它叫做基本摄影常数，p 的值在8lx·s与10lx·s之间。一般一种照相机或曝光表对黑白负片、彩色负片和彩色反转片都采用同一个 p 值。目前世界各国的标准中有用 $p=8$ 的，也有采用 $p=10$ 的。国际标准化组织(ISO)采用的相当于 $p=10$。

要得到一张优质的照片，一定要使照相机控制的像面平均曝光量 H_F 等于感光材料要求

的合适曝光量 H_g，即

$$H_g = H_F \tag{6-9}$$

将(6-4)和(6-8)两式代入(6-9)，有

$$qL\frac{t}{F^2} = \frac{p}{S} \quad 或 \quad \frac{LS}{K} = \frac{F^2}{t} \tag{6-10}$$

式中 $K = p/q$ 为照相机的曝光常数，(6-10)式就是曝光参数方程式。

从曝光参数方程式中看到，除了曝光常数 K 以外，还有摄影景物平均亮度 L、感光材料的感光度 S、摄影时所选用的光圈数 F 和有效曝光时间 t 四个曝光参数。一般称 L 和 S 为外曝光参数，F 和 t 为内曝光参数。通过曝光参数方程可以由外曝光参数 L 和 S 求出内曝光参数 F 和 t。曝光参数方程式是设计曝光表、半自动和自动控制曝光量照相机的依据。

从曝光参数方程式可以看出，相同的外曝光参数，由于曝光常数 K 的不同，得出的内曝光参数是不相同的。各国根据自己实验测试的情况规定了 K 值的大小。例如美国标准取 $K=12.4$，德国标准取 $K=12.7$，前苏联标准取 $K=12.8$。

曝光常数 K 的数值来自大量的摄影和感光度测量试验，是统计测定的最佳平均值。所以，随着摄影科学的发展，K 值的大小将会为未来的实验结果所调整。

二、加法系统(APEX)

上一节讨论的曝光参数方程式(6-10)为

$$\frac{LS}{K} = \frac{F^2}{t}$$

这个方程式已把照相机的内曝光参数 t 和 F 与外曝光参数 L 和 S 联系起来了，只要有外曝光参数就可以计算出内曝光参数。

这个方程式在使用时可以看出有下面几点：

(1) 光圈数 F 是以公比 $\sqrt{2}$ 成等比级数递变的数列(1，1.4，2，2.8，4，5.6 等)，快门的有效曝光时间 t 是以公比 1/2 成等比级数递变的数列(1，1/2，1/4，1/8，1/15，1/30 等)，因此 F^2 与 t 的数列都可以用 2^n 的数列(n 为整数)来表示；

(2) 景物平均亮度 L 的变化范围很大，从几十坎德拉每平方米到几万坎德拉每平方米[①]，如能以对数或指数表示就可以缩小数字的变化范围，运算比较简便；

(3) 一般摄影者对曝光常数 K 的意义不了解，使用曝光参数方程式感到困难；

(4) 乘除运算的方程不如加减运算的方程式计算起来方便。

根据上述情况，将曝光参数方程式进行对数变换，将原来的方程式(6-10)变成加减运算形式的方程式。

首先规定以下这些关系

$$2^{TV} = \frac{1}{t} \tag{6-11}$$

$$2^{AV} = F^2 \tag{6-12}$$

$$2^{SV} = 0.30S \tag{6-13}$$

---

① 亮度单位坎德拉每平方米(cd/m^2)在国际标准中曾用尼特(nit 表示，即 1 尼特＝1 坎德拉每平方米，但已废除。有些国家还有用其它单位，如熙提(sb)，亚熙提(asb)，朗伯(L)等，它们之间的换算关系可参看例如 RCA 公司编的《电光学手册》中译本(国防工业出版社，1978)中有关表格。

$$2^{BV} = \frac{L}{30K} \tag{6-14}$$

以及

$$\frac{LS}{K} = 2^{EV} = \frac{F^2}{t} \tag{6-15}$$

式中 TV 为时间值；AV 为光圈值；SV 为感光材料的感光度值；BV 为亮度值；EV 为曝光值。

将上述这些关系式代入原来的曝光参数方程式中，就得

$$2^{BV} \cdot 2^{SV} = 2^{EV} = 2^{AV} \cdot 2^{TV}$$

或

$$BV + SV = EV = AV + TV \tag{6-16}$$

这就是加法系统中曝光参数方程式的表达式。所谓加法系统是英文 Additive System of Photographic Exposure 的中译，APEX 就是英文各词的首字母的组合词。

在 APEX 中所有的值与原有的曝光参数都是以 2 为底的指数关系。因此，这些值每变化一，相当原来的曝光参数变化一倍，对光圈数和有效曝光时间来讲是改变一档。在这个系统中曝光常数 K 是内含在 BV 值内的，加上整个方程只有加减法运算，所以运算起来很方便。

曝光值 EV，不代表具体的某一个曝光参数，它表示对于具体的外曝光参数 L 和 S 值所对应的曝光值，它同样反映在给定的外曝光参数条件下要保证感光材料有合适的曝光量时内曝光参数 F 和 t 之间的关系。

要用一个方程确定两个参数（F 和 t），用数学上的术语来说，这是一个解不定方程的问题，也就是说，每一个具体的曝光值 EV 相应有好几个可能的 F 和 t 的组合（理论上有无穷多种组合）能使感光材料得到合适的曝光量。曝光值 EV 变化一（增加一或减少一），相应曝光量变化一倍。

所以，解曝光问题的顺序可以表示成

$$BV(L) \text{ 和 } SV(S) \rightarrow EV \begin{cases} \nearrow AV(F) \\ \searrow TV(t) \end{cases}$$

这个示意图表示，由已知的 BV(L)和 SV(S)求得 EV，而后由 EV 求得 AV 和 TV 即 F 和 t 的组合。这也是一般曝光表的工作原理。图 6-1 和图 6-2 就是这个求解过程的图表形式。

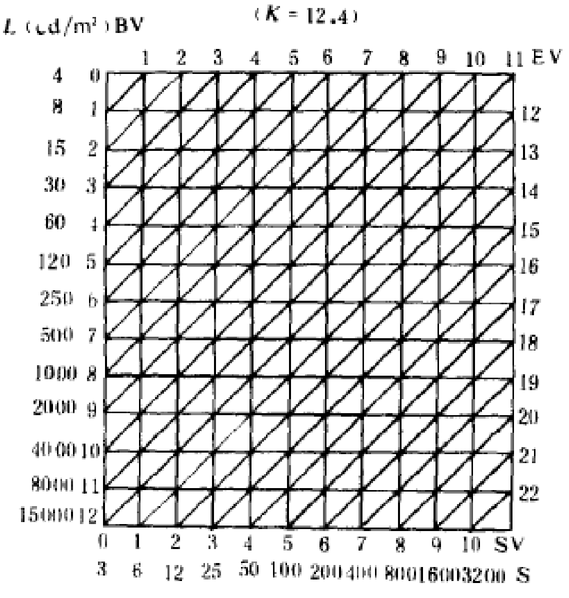


图 6-1 由 BV 和 SV 求解 EV 图

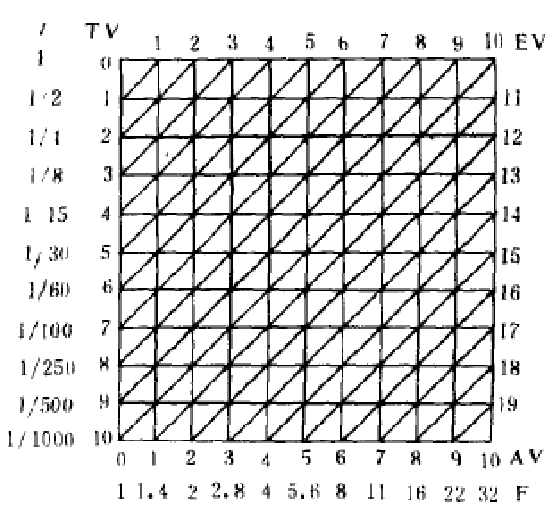


图 6-2 由 EV 求解 AV 和 TV 图

§6-2 一般照相机中曝光量控制方式

正确地控制曝光量是获得一张优质照片的关键，因此正确控制曝光量是摄影者最关心的问题之一。

早期的照相机本身是一个光学和精密机械的结合体。在这种照相机中，曝光参数的引入完全是手动方式，曝光量控制装置就是机械式快门和光圈。用这种手动控制曝光量方式的照相机摄影时，通常是根据摄影者在各种拍摄条件下的实践中所取得的经验或根据光电曝光表的示数选取曝光参数 t 和 F 的，然后用手将所选取的数据装定到快门速度盘和光圈环上。虽然后来产生了内藏光电曝光表的照相机，但是由于它的曝光表与曝光装置是相互独立的，还是要通过人眼读取示数和用手装定到照相机上去。

把内藏曝光表与照相机的曝光装置（快门和光圈）联动起来就形成半自动控制曝光量方式的照相机。

用这种照相机照相时，摄影者先将底片的感光度和快门速度（或光圈数）装定到照相机中去，然后拨动光圈（或快门速度）盘，并在取景窗内观察显示器，当显示器指示"正确曝光"时就停止拨动。这时按下快门释放按钮就能使底片获合适的曝光量。半自动控制曝光量方式的照相机与内藏光电曝光表手动控制曝光量方式的照相的差别，仅在于后者的曝光表要具体示出快门和光圈的具体数值。并且由摄影者将它们装定到照相机中去，而前者的曝光表（或光电装置）只显示装定的曝光参数是否正确，不一定显示具体曝光参数，因而使用起来要比手动控制曝光量方式的照相机方便得多。

随着电子器件的小型化以及照相机本身技术的发展，又产生了自动控制曝光量方式的照相机。用这种照相机摄影时，摄影者只需要装定底片的感光度和快门速度（或光圈数）到照相机中去，而另一个曝光参数（光圈数或快门速度）由自动控制曝光量装置自动进行调节（有的照相机快门速度和光圈数都由自动控制曝光量装置进行自动调节），所以摄影者不用像使用半自动控制曝光量照相机那样观察曝光量控制装置的显示器和再拨动另一个曝光参数的装定盘，只要直接按下快门释放按钮就能获得合适曝光量的底片。

因此，根据自动化的程度，控制曝光量的方式可以分成：手动方式，半自动方式和自动方式三种。

在我们日常摄影时，一般总是根据拍摄对象的情况"优先"确定一个曝光参数（快门速度或光圈数），再根据景物的亮度情况和所使用底片的感光度来决定另一个曝光参数。例如在拍摄运动物体时，我们总是根据物体运动的速度"优先"将快门的速度定得高一些，以保证拍摄得到的底片上的像具有较小的像移量；反之在我们拍摄静止的风景照时为了使拍摄的主体和远处背景都能清晰地成像在底片上，就"优先"将光圈定得小一些，以得到较大的景深。另一种情况是拍摄一般景物，它对快门速度和光圈大小没有特殊要求，只要快门速度和光圈大小"适当"组合使底片能获得合适的曝光量就行。

半自动控制曝光量照相机和自动控制曝光量照相机的结构基本上可以分为：

(1) 速度优先方式。这种方式的照相机，快门速度由摄影者根据需要确定，而光圈大小是由半自动或自动控制曝光量装置决定，以使底片获得合适的曝光量。

(2) 光圈优先方式。这种方式的照相机，光圈大小由摄影者根据需要确定，而快门速度是由半自动或自动控制曝光装置决定，以使底片获得合适的曝光量。

(3) 程序控制方式。采用这种方式的照相机，摄影者不必也不能选择快门速度和光圈大小，它们是按事先设计好的配合程序由半自动或自动曝光量控制装置决定的，以满足底片要求的合适曝光量。最简单的程序控制方式是采用程序快门。这种快门的快门叶片和光阑叶片是合一的，当快门速度高时，光阑孔径也小；反之，快门速度低时，光阑孔径也大。这种快门速度和光阑孔径大小的配合程序是完全由机械结构决定的，快门设计好以后就不能改变了。

目前一些较高级的照相机为了适合各种情况的需要，在一架照相机中就集中了两种优先方式和程序控制方式，即所谓多种控制方式。

§6-3 曝光参数的引入

6-3.1 亮度的测定

从曝光参数方程式 $LS/K=F^2/t$ 看出：自动的或半自动的曝光量控制装置要解曝光参数方程式，首先要测定被摄景物的平均亮度 L。在照相机中用来测定 L 的装置称为测光系统。

一、测光系统中的光电元件

测光系统中光电元件的作用是将代表被摄景物平均亮度 L 的光能量转变成电量，然后利用后面的电路(或机电装置)将这些电量进行运算，解曝光参数方程式。

在照相机测光系统中使用的光电元件应该具有以下几个主要性能：

(1) 光谱灵敏度。光电元件对不同波长的光的灵敏度是不一样的。由于测光系统中的光电元件是代表人眼来判断被摄景物的明亮程度的，因此要求这种光电元件的光谱灵敏度尽量接近标准观察者的视见函数 $V(\lambda)$。

(2) 测光范围。每一种自动和半自动照相机的测光范围，由它的快门的有效曝光时间、光圈数以及所用感光材料的感光度范围来决定。所用的光电元件在照相机的测光范围内要满足灵敏度和线性度的要求。

(3) 响应时间。当光照度改变时，光电元件的输出达到稳定值是需要一定时间的，这个时间应该足够短，一般自动控制曝光量的照相机，特别是在曝光瞬间测光以及具有闪光测光的照相机，要求光电元件的响应时间更短。

此外，还希望光电元件温度稳定性好、不易疲劳、不易老化以及体积小等。

照相机中使用的光电元件主要是半导体光电元件，它们都基于内光电效应。按其物理过程来说，可以分为光电导型和光生伏特型。照相机中最早使用的光电元件是硒光电池。这种光电池虽然有光谱灵敏度接近标准观察者的视见函数 $V(\lambda)$ 和成本低等优点，但由于它有灵敏度低和测光范围小等缺陷，在照相机中已完全被其它光电元件所替代了。目前在中低档照相机中，主要使用硫化镉光敏电阻，而在高档照相机中，主要使用硅光电二极管和磷砷化镓光电二极管。

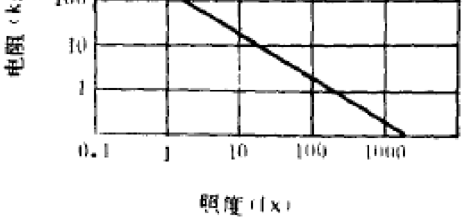


图 6-3　CdS 电阻-照度曲线

1. 硫化镉(CdS)光敏电阻　硫化镉光敏电阻是光电导型光电元件。当照射在它的光敏面上的照度增强时，

它的两个电极之间的电阻值就减小。图 6-3 是一种硫化镉光敏电阻的电阻-照度特性曲线(对数坐标)。光敏电阻的电阻值在低照度侧(<0.1lx)和高照度侧(>1000lx)开始趋向饱和,所以它的特性曲线是非线性的,呈反 S 形(图 6-3 只表示了非饱和的直线部分)。电阻-照度特性曲线的斜率是光敏电阻的一个重要参数,一般称它为 γ 值。γ 值可以表示为

$$\gamma=\frac{\lg R_1-\lg R_2}{\lg E_2-\lg E_1} \tag{6-17}$$

式中 R_1、R_2 分别对应照度为 E_1 和 E_2 的电阻值。由于电阻-照度特性曲线的非线性,所以曲线的不同段处的 γ 值是不一样的,低照度侧和高照度侧较小。E_1 和 E_2 的大小可以根据使用的实际情况来确定,一般光敏电阻的生产厂取 $E_1=10\text{lx}$,$E_2=100\text{lx}$。

硫化镉光敏电阻的光谱灵敏度经过一定的制造工艺的处理与人的视见函数比较接近,图 6-4 是它的光谱灵敏度曲线。虽然它的光谱特性偏向长波,但在中低档照相机中应用时,一般可以不加校正滤光片。

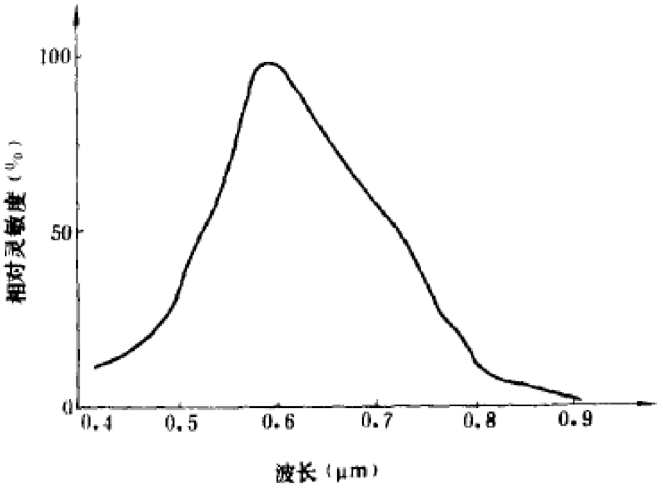


图 6-4 CdS 光谱灵敏度曲线

硫化镉光敏电阻的响应时间与它的光敏面所受的照度有关。在高照度时响应较快,在低照度下它的响应时间较长。因此,硫化镉光敏电阻不宜在太低的照度情况下工作。

硫化镉光敏电阻虽然在低照度下工作性能较差,但是它的成本低、灵敏度高、光谱灵敏度较合适,加上体积小和电压稳定的电池开发出来以后,马上在照相机上代替了原来的硒光电池。

2. 硅光电二极管(SPD) 硅光电二极管是一种光生伏特型光电元件。它可以在反向偏压下工作产生光电流,也可以在零偏压下工作产生光电动势。

一般的硅光电二极管的光谱灵敏度范围是从 0.4μm 到 1.1μm,峰值波长约在 0.9μm 附近,最适用于红光区至红外区探测。为使它的光谱灵敏度曲线接近人的视见函数曲线,适合作照相机的测光元件,就必须附加对红外区锐截止的滤光片。这是很不方便的。近年来制成一种蓝硅光电池(BSC),它的峰值波长在 0.62～0.68μm 范围内(见图 6-5),与人的视见函数曲线比较接近。

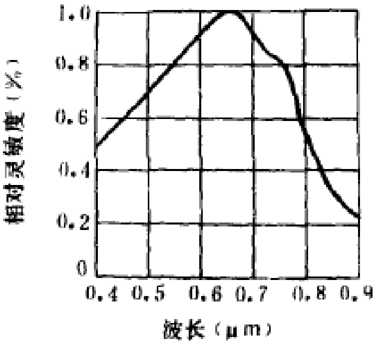


图 6-5 BSC 光谱灵敏度曲线

蓝硅光电池(BSC)在 10^{-4}lx 到 10^4lx 照度范围内工作时,产生的短路电流与照度成严格的比例关系。蓝硅光电池的开路电压与照度成对数关系。蓝硅光电池的响应时间极短,约为 $10^{-6}\sim10^{-5}$s 。但是这种元件产生的信号微弱,仅有几十个 μA。因此在使用时必须与高输入阻抗、高增益和低噪声的高性能的运算放大器相配合,这就造成了工艺复杂和成本高。所以一般在中高档照相机中才使用蓝硅光电池。

3. 磷砷化镓光电二极管(GaAsP) 磷砷化镓光电二极管也是一种光生伏特型光电元件,它的最大特点是它的光谱灵敏度曲线与人的视见函数曲线非常接近(见图 6-6),可以不加校正滤光片而直接用在照相机上。它的其它特性与硅光电二极管基本相同,只是成本比硅光电二

极管高。

比较上面所述三种光电元件可以看出：磷砷化镓光电二极管性能比较理想，但是价格比较高。蓝硅光电池的光谱灵敏度不及磷砷化镓光电二极管好，如果增加校正滤光片就提高了成本，而且这两种光电二极管光电流都比较小，要与高性能的集成电路配合才能使用。所以一般只用在高档的自动控制曝光量的照相机中。

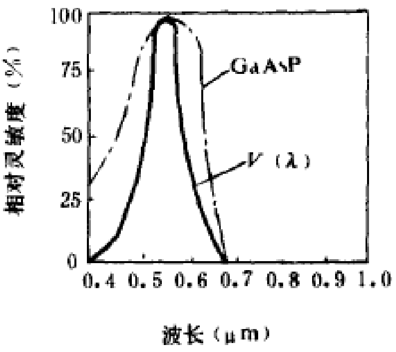


图 6-6 GaAsP 光谱灵敏度曲线

硫化镉光敏电阻虽然测光范围比较小，低照度时响应时间比较长，但是它的光电流比较大，易与一般电路匹配，加上容易制造和成本较低，所以目前仍大量使用在中低档特别是低档自动和半自动控制曝光量的照相机中。

二、测光系统

照相机的测光系统一般可以分为两大类。如果测光系统独立于摄影物镜光路以外，单独成为一个独立系统，就称这类测光系统为外测光系统。另一类的光电元件是通过摄影物镜来测光的，与上一类相对应，称这一类测光系统为内测光系统或 TTL（Through The Lens）测光系统。

1. 外测光系统 由于目前外测光系统都采用尺寸小的光电转换元件，所以整个测光系统的外形尺寸比较小，可以安装在照相机前部的任意部位。有些照相机就把它安装在照相机的摄影物镜的框上。这样安装不但可以使测光视场与摄影视场比较一致，而且当摄影物镜加滤光片时，同时也复盖了测光系统。这样，测光系统也就把滤光片的参数引入了。

光电元件的输出在其它条件相同的情况下取决于光敏面所受的照度。

如图 6-7 所示的光电元件，它的受光角为 2ω。当用它来测平均亮度为 L 的被摄景物时，由于光敏面的面积远比被摄景物面小，所以光敏面的平均照度可以表示为

$$E = \pi L \sin^2\omega \tag{6-18}$$

从(6-18)式可见，光电元件光敏面所接受的平均照度 E 是正比于被摄景物平均亮度 L 的，所以光电元件的输出是响应被摄景物的平均亮度 L 的。

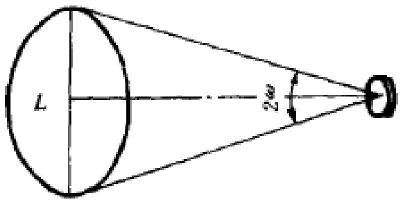


图 6-7 光电元件的受光角

由于测光系统要测的是被摄景物的平均亮度，所以受光角一般总是等于或略小于摄影物镜的视场角。为了限制光电元件的受光角，所以在光电元件前面都要加限制受光角的部件。

最简单的限制受光角的方法是把光电元件放在一块有圆孔的挡片后面，一般为了保护光电元件，在圆孔前面还要加一块透明的保护片。这种系统没有一般光原系统中的透镜，所以一般称为无透镜外测光系统。对于图 6-8 所示的测光系统，它的光敏面中心照度为

$$E_0 = \pi L \tau \sin^2\omega = \pi L \tau \frac{R_1^2}{H^2 + R_1^2} \tag{6-19}$$

式中 τ 为保护片的透过率；$R_1 = D_1/2$。

这种测光系统的最大受光角为 $2\omega'$

$$2\omega' = 2\mathrm{arc\ tg}[(D_1 + D_2)/2H] \tag{6-20}$$

式中 D_2 为光电元件光敏面的直径。

由图 6-8 可以看出，在最大受光角 $2\omega'$ 时的渐晕为 100%，实际有效受光角可以按一定的渐晕要求来计算。从(6-19)和(6-20)两式可以看出，当要通过改变入射孔的直径 D_1 的大小来引入其它曝光参数时(后面将要讨论)，受光角也跟着变化。但是这种测光系统结构简单，所以常用在廉价的普及型照相机中。

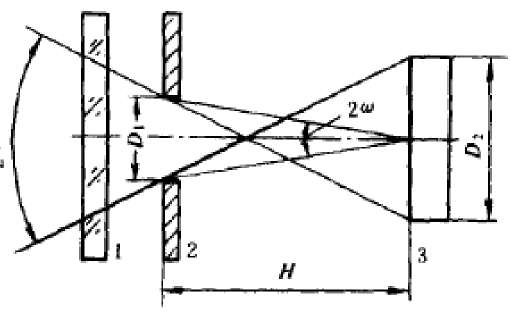


图 6-8 无透镜外测光系统
1—保护片；2—光阑；3—光电元件

把上述无透镜外测光系统中的保护片换成一块小的凸透镜，就成为有透镜外测光系统(图 6-9)。

由于这种透镜只起传递光能的作用，对像质没有要求，所以一般都是用有机玻璃压制成的。小透镜的焦距很短，摄影距离范围内的景物几乎都成像在焦面上，为了得到明确的受光角，光电元件的光敏面似乎应该与焦平面重合，但是为使光电元件光敏面上的照度均匀一些，实际上一般光敏元件与焦平面是不重合的，而是在它的附近。

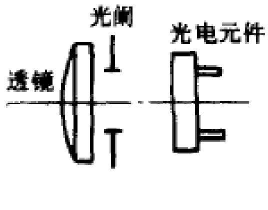


图 6-9 有透镜外测光系统

有透镜外测光系统的受光角可以由几何光学公式按元件的实际尺寸计算出来。也可以近似地表示为

$$2\omega \approx 2\mathrm{arc\ tg}\ D/2f'$$

式中 f' 为小透镜的焦距；D 为光电元件光敏面的直径。

有透镜外测光系统的光敏面中心照度也可以与摄影物镜类似，近似以下式表示

$$E_0 \approx \frac{\pi}{4}\tau_{测} L \frac{1}{F_{测}^2} \tag{6-21}$$

式中 $\tau_{测}$ 为小透镜的透过率；$F_{测}$ 为小透镜的光圈数。

2. TTL 测光系统(内测光系统) TTL 测光系统中的光电元件是通过摄影物镜进行测光的，所以不需要另加透镜。由于测光系统与摄影系统采用同一透镜，因此有以下几个特点：

① 测光元件只接受摄影视场内景物的光线，受摄影视场外的景物的光线影响很小，当更换不同视场角的物镜时，测光系统的受光角也会自动地作相应的变化；

② 测光系统自动引进了物镜的透过率和滤光镜倍率；

③ 可以自动修正因摄影距离变化而引起象面照度的变化。

TTL 测光系统中，光电元件放置的位置可以有比较多的方案(见图 6-10)，光电元件的理想位置应该在底片平面附近。可以采用一个活动臂把光电元件放置在焦面快门前(图 6-10 中的 8)，来自摄影景物的光线一部分通过反射镜的半透区(图 6-10)中的 $m1$ 射到光电元件上，曝光时光电元件移开光路。由于这种方法结构比较复杂，目前已经很少采用。替代这种方法的是用光电元件(图 6-10 中的 7) 测量底片或焦面快门的反射光。在这种方法中，光电元件是在反射镜抬起、底片曝光的同时进行测光(其它几种方法都是在反光镜抬起以前和底片开始曝光以前进行测光的)。因此，只要光电元件响应足够快，它就能反应在曝光期间被摄景物的亮度变化及光圈的控制误差，通过改变曝光时间进行补偿。这种方法也可以进行闪光摄影的自动曝光量控制。由于以上两种方法是直接测量底片或焦面快门的受光量或反射光量，所以这两种方法也称为 TTL 直接测光方式。

除了直接测光外，还可以在等效底片平面附近进行测光。所谓等效底片平面就是离开摄影物镜出瞳的距离与底片平面离开摄影物镜出瞳距离相等的平面。调焦屏就是这样一种平面。有

些照相机就是借助一个分光系统(图 6-10 中的 $b3$)把到达调焦屏的一部分光线转向位在屏外的光电元件上(图 6-10 中的 5),并且把这一部分测量区画在屏上,可以很清楚地看到被测量的景物是哪一部分。另一个等效底片平面是在反射镜下方。反射镜上一个半透区(图 6-10 中的 $m1$)透过来自摄影物镜的光线,经过一个附加的小反射镜(图 6-10 中的 $m2$)投射到光电元件(图 6-10 中的 6)上。

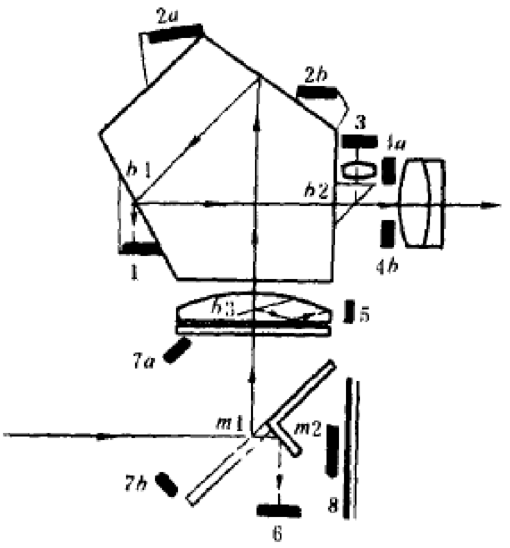


图 6-10 TTL 测光系统光电元件安置图

另一种通常采用的方法是将光电元件放置在五棱镜的罩上(图 6-10 中的 1、2a、2b、3)或目镜壳上(图 6-10 中的 4a、4b),用这些元件来测量调焦屏上像的照度(对应被摄景物像的照度)。这种方法可以用一只光电元件测量整个调焦屏上像的照度或用两个光电元件着重测量调焦屏上中央部分像的照度。

还有一种简单的办法是把光电元件贴附在反射镜的后面,反射镜做成半透的,这样就允许来自摄影物镜的一部分光线落到光电元件上(图中未标出)。这种办法不适合可换镜头的照相机。一般不同焦距的摄影物镜。它的出瞳位置是不一样的,因此出瞳离开反射镜的位置就有变化,于是反射镜的测量区以不同的位置横截来自出瞳的光锥,光电元件就采集不同的光锥横截面的光。

TTL 测光系统是测量由照相机光学系统传输来的被摄景物光。但是光电元件不一定总是测量摄影物镜视场内全部景物的光。根据光电元件的数量以及放置位置等情况,一般可以分成:平均测光、部分测光、中央重点测光和多区域测光四种测光方式。

平均测光方式是在几乎整个摄影视场内,用大致相同的灵敏度测光[图 6-11(a)]。这种测光方式使得被摄主体的曝光量容易受到背景色调分布以及亮度范围变化等影响,所以适合于摄影画面内亮度差不大的情况。

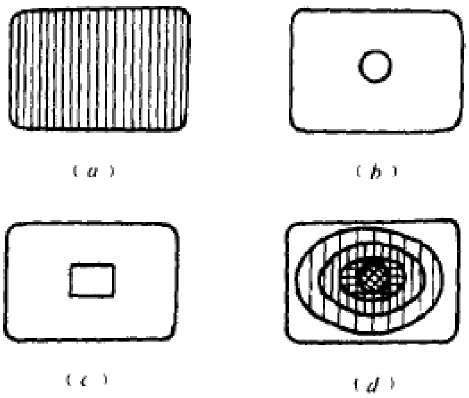


图 6-11 平均和重点测光
(a)平均测光; (b)点测光;
(c)局部测光; (d)中央重点测光

部分测光方式又可以分为点测光方式和局部测光方式。点测光方式[图 6-11(b)]中的测光元件只对摄影画面中心约占整个画面的 2%～3%的部分进行测光。局部测光方式[图 6-11(c)]中的测光元件所测区域比前者要大一些,一般是对摄影画面中央区约占整个画面的 6%～12%的部分测光。部分测光方式主要是对摄影主体进行重点测光,保证主体曝光量合适。

中央重点测光方式是一种折衷方案,它是对整个摄影画面内的景物都进行测光,但是对画面中央约占整个画面 2/3 的部分特别敏感,测光灵敏度从画面中央的这一部分向四周逐渐减弱[图 6-11(d)]。这种测光方式除了保证摄影主体有合适的曝光量之外,还兼顾了画面边缘部分的景物曝光量。由于具备这个优点,所以现有的大部分单镜头反光照相机采用中央重点测光方式。

多区测光方式是将整个摄影画面分成数个测光区,由数个光电元件分别测量每个区的摄影景物的亮度信息。微机根据这些亮度信息进行处理和判断,确定被摄景色是属于那种类型,并计算出合适的曝光参数。因此,这种测光方式使得曝光正确率很高,即使在很多特殊的景色

场合，不进行人工曝光补偿，也能获得合适曝光量的照片。图 6-12 是一个把摄影画面分成五个测光区的例子。

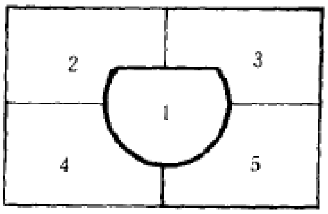


图 6-12 多区测光

由于 TTL 测光系统的光电元件所接受的光是经过摄影物镜的，所以测光可以在摄影物镜的光圈收缩到选定的光圈大小情况下进行，也可以在全开到最大光圈情况下进行。

收缩光圈测光由于光电元件接受的光能量不仅与景物平均亮度有关，而且还受到光圈大小的影响，所以光电元件在测光同时把所选定的光圈大小也传递给曝光量控制电路。这样，物镜的光圈就不需要再有其它装置与曝光量控制电路进行参数传递，结构就比较简单。但是大多数 TTL 测光系统在测光同时也用以进行取景和测距，由于收缩光圈使取景视场变暗，这就影响取景和测距精度，并且收缩光圈测光时到达光电元件的光在其它情况相同时比全开光圈时要小，所以要求测光元件有较高灵敏度。早期的 TTL 测光系统是采用收缩光圈测光，目前一般 TTL 测光系统都采用全开光圈测光。当然全开光圈测光必须有一个专门的装置将预先设定的光圈大小传递给曝光量控制电路，而且采用的是预缩光圈（预缩光圈的结构见第四章）。

在 TTL 测光系统中，除了那种用光电元件在反光镜抬起、底片曝光的同时进行测光的方法（图 6-10 中的 *7a*，*7b*）以外，其它几种方法都是在曝光以前先测光，曝光瞬时就不能测光（因反光镜抬起挡住光路或光电元件移出光路。）这就存在一个怎样把测光时得到的信息保存起来，到曝瞬光间再提供给控制电路的问题，这就是一般所谓记忆的问题。

最简单的记忆元件就是漏电小的电容器。测光时，通过开关把测光电路与电容器连接起来，电容器就被充电到代表测光信号的电压值，测光完毕时，开关就断开。由于控制电路是以高输入阻抗的缓冲放大器与记忆电容器相连接的，所以记忆电容器中的电荷很难泄放掉，即电容器上代表测光信号的电压能保存较长时间，供曝光时控制电路应用。除了记忆测光信号外也可以采用记忆通过计算电路计算出的代表控制快门曝光时间的信号。这两种方法目前在照相机中都有采用。当然具有数字电路的曝光量控制电路是将信号转换成数码记忆在半导体存贮器中的。

具有 TTL 测光系统的半自动控制曝光量照相机是不必采用记忆电路的。因为采用半自动控制曝光量照相机摄影时，摄影者一面测光一面就用手拨动快门曝光时间控制盘或光圈控制环，测光完毕，这些曝光参数也就装定完毕，因此也可以说，在半自动控制曝光量照相机中是由快门时间控制机构或光圈控制机构本身来记忆曝光参数的。

6-3.2 曝光参数 SV、AV 和 TV 的引入

在上面我们已经讨论了亮度 L 的引入方法，下面我们再讨论另外三个曝光参数引入的常用的几种方法。

一、通过测光系统引入其它曝光参数

测光系统当然是为了测定被摄景物的平均亮度 L 而专门设置的装置，但是，在测光系统中加一些部件后，也可以通过测光系统把其它曝光参数引入到曝光量控制系统中去。这一点的可能性可以从曝光参数方程式看出。在 § 6-1 中我们已经给出，加法系统中的曝光参数方 程式的形式是 BV+SV=EV=AV+TV，这个式子说明，当 BV 和 SV 之和变化若干值时，AV 和

TV 之和也必须改变相同的值才能使底片获得合适的曝光量。因此，SV 的变化和 BV 的变化对 AV 和 TV 之和的变化所起的影响是一样的。所以可以把 SV 的变化对 AV 和 TV 之和的影响“看作”是由 BV 变化而引起的。

BV 的变化是通过测光系统中光电元件光敏面上的平均照度变化(在光敏面受光面积不变时，也就是光通量变化)而引起的光电元件的输出信号变化传递给测光电路的。BV 值变化 ΔBV 时，光敏面上的平均照度变到原来的 $2^{\Delta BV}$倍。因此，当 SV 值要变化 ΔSV 时，我们可以借助于一种装置人为地把光敏面上的照度变化到原来的 $2^{\Delta SV}$倍。

有的自动或半自动控制曝光量方式的照相机除了要人工引入底片感光度 S 以外，还要人工引入预先装定好的光圈数 F 或快门的曝光时间 t。这时上式可改写

$$TV = BV + SV - AV \quad 或 \quad AV = BV + SV - TV$$

因此同样可以把 AV 的变化或 TV 的变化等效为 BV 的变化，通过测光系统把它们引入到控制电路中去。当 AV 值变化 ΔAV 时，应通过一定的装置使光电元件光敏面上的平均照度人为地改变到原来的 $2^{-\Delta AV}$倍。同样，当 TV 值变化 ΔTV 时，人为地使光敏面的平均照度改变到原来的 $2^{-\Delta TV}$倍。对于快门和光圈同时改变的半自动程序控制曝光量方式的照相机，就应该人为地使光敏面上的平均照度改变到原来的 $2^{-(\Delta TV+\Delta AV)}$倍。

从上面分析中可以看出，只要人为地改变测光系统中光电元件光敏面的平均照度，就能人为地把其它曝光参数引入到曝光量控制电路中去。目前这样引入曝光参数的方法，常用的有两种：一种方法是在测光系统中加一个简单的有效光阑，根据要引入的不同的曝光参数值来改变有效光阑的通光孔的面积，从而改变测光系统的入瞳面积，这就改变了光电元件光敏面的平均照度；另一种方法是在测光元件光敏面前面加一片透光率渐变的减光片，根据要引入的曝光参数值改变减光片的透光率，从而改变光电元件光敏面上的平均照度。

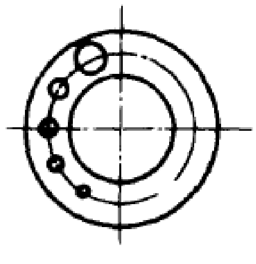


图 6-13　小孔光阑片

如果 ΔSV、ΔAV 和 ΔTV 一档一档地改变。那么，光电元件光敏面的照度是以 2 为公比变化的。所以引入曝光参数的光阑片不必做成孔径连续变化的复杂结构，可以在一片不透光的薄圆片上沿圆周开一系列小孔而成(图 6-13)，这些小孔的孔径按一定的规律变化。下面将分别在无透镜的测光系统和有透镜的测光系统统中推导小孔孔径的设计计算公式。

在无透镜的测光系统中，光电元件光敏面所受到的照度为[见(6-19)式]

$$E_0 = \pi\tau L \frac{R^2}{H^2 + R^2}$$

而在第 n 个小孔时光电元件光敏面的照度为

$$E_{0n} = \frac{1}{2^{n-1}}E_0, n = 1,2,3,\cdots$$

根据以上两式，第 n 个小孔的半径为

$$R_n = \sqrt{\frac{R_1{}^2H^2}{R_1{}^2(2^{n-1} - 1) + 2^{n-1}H^2}}$$

式中 R_1 为第一个小孔的半径。

因此，由结构等因素确定最大孔的半径 R_1 后，就可以按上式计算其后一系列小孔的半径 R_n。当然，在最大孔确定后，其后的孔数 n 也不能太多。因为最小孔的半径太小时，测光系统中光电元件光敏面上的照度就太低了。

在有透镜测光系统中，光电元件光敏面所受到的照度为[见(6-21)]

$$E_0 = \frac{\pi}{4}\tau_{测} L \frac{1}{F_{测}^2}$$

也就是说与光阑孔直径的平方成正比，所以第 n 个孔的直径

$$d_n = d_1\sqrt{\frac{1}{2^{n-1}}}$$

式中 d_1 为第一个小孔(最大孔)的直径。

同样，根据结构参数确定 d_1 后，就可以按上式计算出其它各孔的孔径。允许最小孔的孔径受加工工艺和光电元件允许的最低照度的限制。

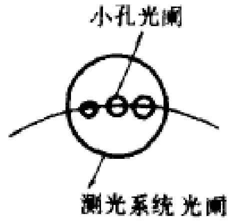


图 6-14　细分档小孔光阑

实际上，大多数照相机中又把上述每一个孔分成几个小孔，几个小孔的通光总面积等于原来的 一个孔的通光面积，例如(图 6-14)用三个小孔代替原来的一个孔。这样，就有可能引入小于 1 档的变化。

假设我们用 j 个孔代替原来的一个孔，而且每改变 i 个孔相应底片的感光度或快门速度(或光圈数)变化一档。也即 j 个小孔的通光总面积变化一倍。如果第 n 个小孔的直径为 d_n，而且 d 是以 q 为公比递减的数列，那么就有

$$\frac{\pi}{4}(d_n^2 + d_{n+1}^2 + \cdots + d_{n+i-1}^2 + \cdots + d_{n+j-1}^2)$$

$$= 2 \times \frac{\pi}{4}(d_{n+i}^2 + d_{n+i+1}^2 + \cdots + d_{n+i+j-1}^2)$$

代入 q，得

$$\frac{\pi}{4}[(d_n^2 + (qd_n)^2 + \cdots + (q^{i-1}d_n)^2 + \cdots + (q^{j-1}d_n)^2]$$

$$= 2 \times \frac{\pi}{4}[(q^i d_n)^2 + (q^{i+1}d_n)^2 + \cdots + (q^{i+j-1}d_n)^2]$$

简化上式，得

$$q = 2^{-1/2i} \tag{6-22}$$

(6-22)式表明如果想要改变 i 个小孔使引入的底片的感光度或快门速度(或光圈数)正好变化一档的话，那么小孔的直径是以 $2^{-1/2i}$ 为公比递减的数列。

例如取 $i=3$，这时小孔的直径是以 $2^{-1/6}$ 为公比递减的数列，小孔的通光面积是以 $2^{-1/3}$ 为公比的数列。如果我们变动一个小孔，相当于底片的感光度或快门速度(或光圈大小)变化 1/3 档。改变 3 个小孔相当于底片的感光度或快门速度(或光圈大小)改变一档。

如果所用测光系统最大允许的光阑直径为 d_{max}，用 j 个直径为 $d_1, d_2, \cdots, d_j$ 的小孔来等效它，那么就有

$$\frac{\pi}{4}d_{max}^2 = \frac{\pi}{4}(d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_j^2)$$

$$= \frac{\pi}{4}d_1^2[1 + q^2 + (q^2)^2 + \cdots + (q^{j-1})^2]$$

所以

$$d_1 = d_{max}\sqrt{\frac{1-q^2}{1-(q^2)^j}}$$

由于 $q=2^{-1/2t}$，则

$$d_1 = d_{\max}\sqrt{\frac{1-2^{-1/t}}{1-2^{-j/t}}} \tag{6-23}$$

由(6-23)式就可以通过 $d_{\max}$ 求出第一个小孔直径 d_1，再以公比 $2^{-1/2t}$ 依次求出其它一系列小孔直径 $d_2, d_3, \cdots$。

用几个小孔来等效一个通光孔，在大孔端势必有几个相邻小孔之间要发生重叠。因此一般在大孔端用一个类似牛角形的连孔来代替几个小孔。这种替代一定要使每移动一个孔位时，连孔通光面积的变化与原来小孔面积变化等效。这样设计出来的小孔光阑片就如图 6-15 中的 1 所示。

用一个小孔光阑片要同时能装定两个曝光参数，它是采用一种差动装置来实现的，图 6-15 是这类差动装置的示意图。我们可以先转动底片的感光度调节圈 2，把它转到相应的感光度值。它是相对于快门速度调节圈(或光圈调节圈)3 转动的，同时它又带动小孔光阑片 1 转动到相应的孔位，这样底片感光度就调节完毕。当要调节快门速度(或光圈)时，就转动快门速度调节圈(或光圈调节圈)3。它一方面通过件 4 带动快门速度调节凸轮(或光圈调节凸轮)转动，调节了快门速度(或光圈大小)，另一方面又同时带动感光度调节圈 2 使小孔光阑片转到相应的孔位，这样就把快门速度(或光圈)也调节完毕。入射瞳孔内小孔光阑总通光面积的变化倍数是 ΔSV 和 ΔTV(或 ΔAV)的代数和。

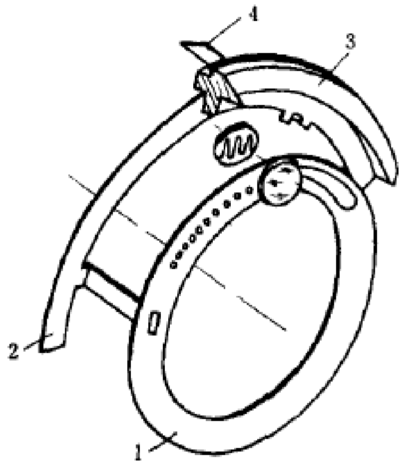


图 6-15　用一个小孔光阑片同时引入两个曝光参数的装置

对于用减光片引入曝光参数的测光系统，同理可得出减光片各段的透过率为

$$\tau_n = \tau_1 \times \frac{1}{2^{n-1}},\ n = 1, 2, 3, \cdots$$

式中 τ_1 为最大透光段的透过率。

这种减光片可以作成每一段的透光率是均匀的，也可以作成如图 6-16 的栅格状。栅格状的减光片的制造工艺比前一种要容易一些，因为所有透明栅条的透过率都相同。只要转动减光片，改变进入测光系统光阑内的透明栅条的总面积，就可以调节光电元件光敏面上的照度。

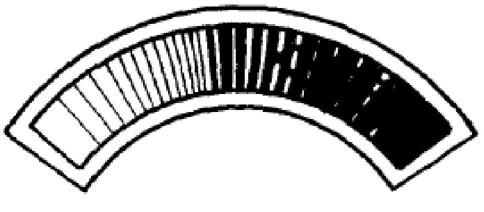


图 6-16　栅格状减光片

减光片可以像小孔光阑片那样单独使用，引入一个或两个(采用差动装置)曝光参数，也可以与小孔光阑片同时使用来引入两个或两个以上曝光参数。例如有一种半自动控制曝光量的程序快门照相机，它的底片感光度是由小孔光阑片引入，而程序快门的曝光参数却由减光片引入。这种装置不需要差动机构，如图 6-17 所示。图中 1 为小孔光阑片，2 为控制程序快门曝光参数的曲线槽，3 为减光片，4 为硫化镉光敏电阻。

二、通过电位器和编码器引入曝光参数

借助于测光系统引入曝光参数，只是引入曝光参数方法之一。除了景物亮度 L，另外三个曝光参数也可以用其它方法引入，其中最常用的器件是电位器和编码器。

1. 电位器 照相机中的电位器的电阻体是在一个硬质绝缘圆环上制作一层金属薄膜电阻(图 6-18)。一般电阻体与照相机的某一部件相固定,而电位器的活动电刷则与曝光参数调节环(如光圈调节环)相联系。这样,在转动曝光参数调节环时,活动电刷在环形电阻体上就处在不同的位置,在电阻体两端加电压的情况下,活动电刷就可以输出与所调节的曝光参数大小有关的电压。电位器根据需要可以设计成输出与转角成线性关系的,也可以成函数(如对数)关系的。

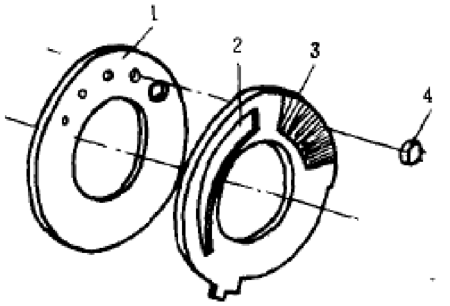


图 6-17 小孔光阑和减光片曝光参数引入装置

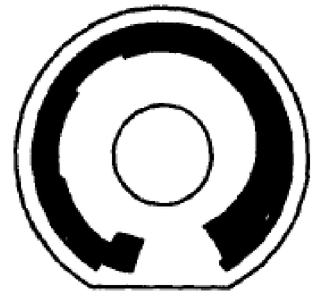


图 6-18 电位器的电阻体

2. 轴角编码器 轴角编码器是在一块硬质基体上印制出导电的数字式图形(见图 6-19),在旋转轴上安置一排接触片。当与曝光参数的调节环联动的旋转轴在不同位置时,各接触片与数字式图形的不同位置相接触,组成一组数字量输出。这样就可以将代表曝光参数的模拟量(转角)转变成数字量输入到数字电路或微机电路供控制曝光量用。

一般轴角编码器的数字式图形都作成格雷码形式。格雷码与其它二进制码不同的特点是相邻两代码之间只有一位状态发生变化,这样可以免除因码盘和接触片的制造误差形成输出量 的很大误差。但是,它的输出必须经过译码转换成普通的二进制码才能供数字电路或微机进行运算和处理。

3. DX 编码 DX 编码是感光胶片生产厂在 135 胶卷暗盒上印制的两行电触点(图 6-20),用其不同的通断组合,反映胶卷盒中胶片参数的一种专用编码。

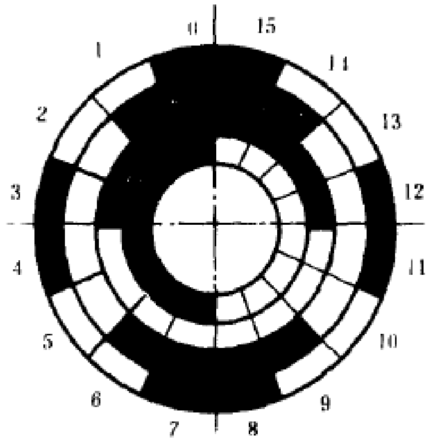


图 6-19 轴角编码器的数字式图形

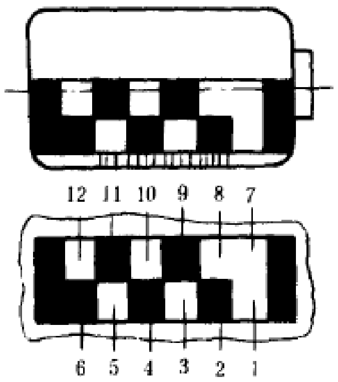


图 6-20 DX 编码胶卷盒

第一行电触点中的触点 1 为公共导电点,其余触点 2~6 与其通断情况反映该胶片的感光度(表 6-1)。第二行中的触点 7 也为公共导电点,触点 8~10 与其通断情况反映该胶片的张数(表 6-2)。触点 11 和 12 与触点 7 的通断情况反映胶片的宽容度(表 6-3)。因此,只要将带有印制 DX 编码的胶卷盒放入带有相应电触头的照相机暗盒中时,电触头将自动地把该胶卷盒中的胶片感光度等参数引入到照相机电路中去,免去人工拨动感光度调节盘等手续。

表 6-1　胶片感光度的 DX 编码

胶片感光度	接通触点序号				
ISO	2	3	4	5	6
25	—	—	—	5	—
32	—	—	—	—	6
40	—	—	—	5	6
50	2	—	—	5	—
64	2	—	—	—	6
80	2	—	—	5	6
100	—	3	—	5	—
125	—	3	—	—	6
160	—	3	—	5	6
200	2	3	—	5	—
250	2	3	—	—	6
320	2	3	—	5	6
400	—	—	4	5	—
500	—	—	4	—	6
640	—	—	4	5	6
800	2	—	4	5	
1000	2	—	4	—	6
1250	2	—	4	5	6
1600	—	3	4	5	—
2000	—	3	4	—	6
2500	—	3	4	5	6
3200	2	3	4	5	—
4000	2	3	4	—	6
5000	2	3	4	5	6

表 6-2　胶片张数的 DX 编码

序号	胶片	接　通　触　点　序　号		
	张数	8	9	10
1	12	8	—	—
2	20	—	9	—
3	24	8	9	—
4	36	—	—	10
5	—	8	—	10
6	—	—	9	10
7	72	8	9	10

表 6-3　胶片宽容度的 DX 编码

胶　片　宽　容　度	接　通　触　点　序　号	
	11	12
±1/2	—	—
±1	11	—
+2，−1	—	12
+3，−1	11	12

§ 6-4　半自动控制曝光量的基本原理

半自动控制曝光量的照相机是在内藏曝光表照相机的基础上发展起来的。因此，早期的半自动控制曝光量照相机的电路也是采用和曝光表类似的以光敏元件和微型电流表为主的电路，它们的快门和光圈的基本结构和一般照相机的快门和光圈也没有多大差别，只是它们与测光装置有一定的联系，微型电流表的指针的位置只要指示快门（或光圈）是否拨动到合适的曝光参数位置，可以不显示曝光参数的具体值。

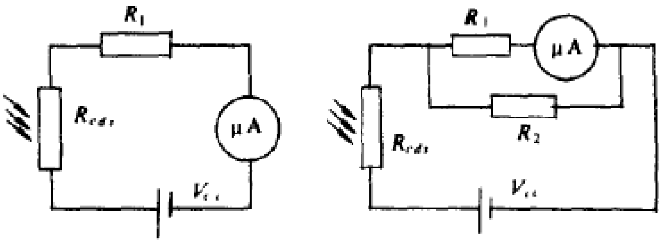
随着半导体技术和集成电路的发展，目前大多数半自动控制曝光量方法已采用半导体集成比较电路和发光二极管（LED）代替微型电流表作为运算指示电路。

6-4.1　微型电流表指示型半自动控制曝光量的基本原理

一、基本电路

这种类型的最基本的电路原理图如图 6-21(*a*)所示。这个电路是由光敏电阻 R_{CdS}（早期采用硒光电池）、微型电流表、电池和电阻 R_1 组成。

电阻 R_1 主要用来保护微型电流表，以免光敏电阻受强光照射时，流过电流表的电流太大。另一方面当实际电路的元件参数与设计值有差别时，可以通过改变 R_1 的值来进行适当的校正。有时为了使校正范围大一些，采用如图 6-21(*b*)所示的两个校正电阻（R_1 和 R_2）的电路。



(*a*)　　　　(*b*)

图 6-21　基本电路

我们知道，电流表指针的转角 α_a 与流过其电流有关，对于图 6-21(*a*)的电路有

$$\alpha_a = \frac{S_a V_{CC}}{R_{CdS} + R_r + R_1}$$

其中 R_r 为电流表内阻；S_a 为电流表灵敏度。

二、曝光参数的引入

在微型电流表指示型半自动控制曝光量的装置中，电流表转角 α_a 是代表照相机的曝光参数大小。上述公式中，S_a、R_r 和 V_{CC} 一般是定值，可以改变 α_a 的参数有 R_{CdS} 和 R_1。

在曝光参数引入一节中我们讲过曝光参数 BV 一定是通过测光系统引入的，也可以在测光系统中加入可变小孔光阑片等引入其它曝光参数，例如底片感光度 S。这时光敏电阻的阻值 $R_{CdS} = f(\mathrm{BV}, \mathrm{SV})$。所以电流表指针的转角 α_a 为

$$\alpha_a = \frac{S_a V_{CC}}{f(\mathrm{BV}, \mathrm{SV}) + R_1 + R_r}$$

即电流表指针转角 α_a 指示了 L 和 S 的大小。

我们若在测光电路中串一个可变电阻来改变电流表指针的转角 α_a，同样可以引入除曝光

参数 L 以外的其它曝光参数。

上面两种方法都是通过改变电路的参数使电流表指针偏转 α_a 角来指示曝光参数的。另外，我们也可以通过转动电流表的基座，使电流表指针产生一个附加转角 α''_a 引入其它曝光参数。如果这个附加转角 α''_a 与底片感光度 S 有关(图 6-22)，那么电流表指针相对于相机机体的转角 α_a 就是引入曝光参数 L 的转角 α'_a(BV)和引入曝光参数 S 的附加转角 α''_a(SV)的和，即

$$\alpha_a = \alpha'_a(\mathrm{BV}) + \alpha''_a(\mathrm{SV})$$

所以，α_a 的大小也表示着曝光参数 L 和 S 的大小。

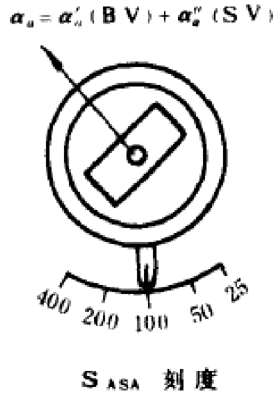


图 6-22 转动电流表基座引入曝光参数

三、合适曝光量的指示

微型电流表指示型半自动控制曝光量方式的照相机指示合适曝光量的方法，有追针指示法和定点指示法两种。

追针指示法如图 6-23 所示。在取景器中我们能看到一根电流表的指针 1 以及与快门和光圈调节圈联动的追针 2，一般还设有曝光量过度和曝光量不足的标记 3 和 4。

在测光时电流表的指针根据被摄景物的平均亮度 L 以及底片的感光度 S 的大小转过一个 α_a 角[图 6-23(a)所示]，它的大小正比于 BV+SV。由于光圈调节圈与快门调节圈是通过机械加法机构与追针联动的。所以摄影者就以追针朝电流表指针方向转动光圈调节圈或快门调节圈，当追针与电流表指针重合时[图 6-23(b)]，光圈和快门就被调节到能获得合适的曝光量的位置，即

$$\mathrm{AV} + \mathrm{TV} = \mathrm{BV} + \mathrm{SV}$$

当电流表指针转到曝光量过度或不足的标记的范围以外时，说明这时被摄景物的平均亮度已超出这架照相机能使所用底片获得合适曝光量的控制范围。

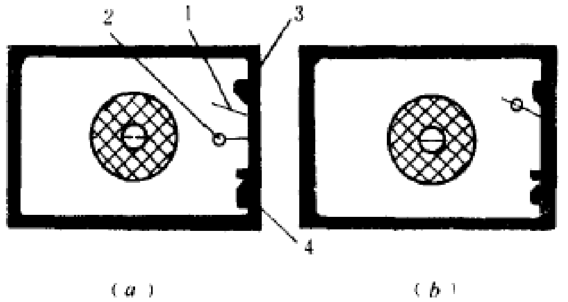


图 6-23 追针指示

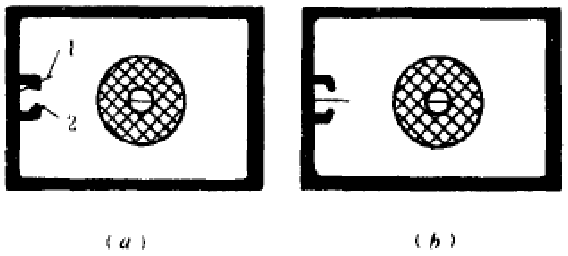


图 6-24 定点重合指示

定点重合法如图 6-24 所示，在取景器中只能看到一根电流表指针 1 和定点标记 2。测光时，电流表指针可能处在定点标记以外的一个位置上[图 6-24(a)]，由于快门和光圈也是通过机械加法机构与曝光参数引入装置相连，所以，当摄影者拨动快门速度或光圈调节圈，使电流表指针回到定点标记中间[图 6-24(b)]就停止拨动，这时快门速度和光阑孔径就被装定在使底片获得合适曝光量的位置上。

微型电流表指示型半自动控制曝光量方式的照相机的根本问题是，微型电流表装配困难，成本高，不耐振，在弱光情况下，取景器屏较暗，给对准指针带来一定困难。

6-4.2 发光二极管(LED)跳灯指示型半自动控制曝光量的基本原理

一、合适曝光量的显示方法

一般是在取景器设置二个或三个发光二极管以不同位置的发光二极管的亮暗情况来指示曝光量合适，过度和不足。

图 6-25 是以三个发光二极管来显示的。上面的红色发光二极管发光表示曝光量过度(OVER)，下面的红色发光二极管发光表示曝光量不足(UNDER)，中间的绿色发光二极管发光表示曝光量合适(OK)。

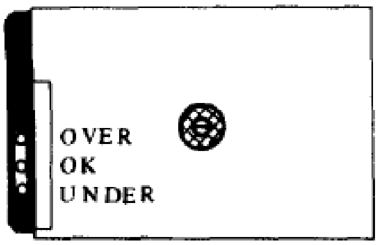


图 6-25 跳灯指示

有时为了简化电路(特别是用分立元件时)，采用二个发光二极管，一般上面一只发光二极管发光时表示曝光量过度，下面一只发光二极管发光时表示曝光量不足，上下两只同时不发光时，表示曝光量合适。

由于我们在拨动曝光量参数调节圈时，发光二极管的发光情况是突变的，在取景器中看到二个或三个亮点在跳跃，所以称这种显示方式为跳灯显示。

二、电路的工作原理

发光二极管的亮暗情况是由窗口电压比较器进行控制的。为了说明窗口电压比较器的工作原理，我们先讨论一般的电压比较器。

电压比较器是用来比较两个电压的电子线路，它在曝光量控制电路中用得比较多。在分立元件的电路中一般用施密特触发器作为电压比较，而在集成电路中多半是以双端差动输入单端输出的高放大倍数窄线性区的放大器作为电压比较器。所以，一个集成电路的电压比较器可以用图 6-26 来表示(电源没有画出)。由于要比较两个电压的大小，所以它设有两个电压的输入端 1 和 2，还有一个输出端 3。输入端 1 称为同相输入端，用“＋”标记；输入端 2 称为反相输入端，用“－”标记。当同相输入端的输入信号大于反相端输入信号时，输出信号与同相输入端的输入信号相位相同；当反相输入端的输入信号大于同相端的输入信号时，输出信号的相位与反相端输入信号的相位相反。因此有

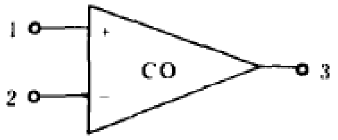


图 6-26 电压比较器

$$V_0 = A_0(V_{i_1} - V_{i_2})$$

其中 V_0 为电压比较器的输出电压值；A_0 为电压比较器的电压增益；V_{i_1} 为电压比较器的同相端输入电压；V_{i_2} 为电压比较器的反相端输入电压。

由于照相机采用单电源工作，那么输入信号 V_{i_1} 和 V_{i_2} 都是同相位的，而且 V_0 的最大值不会超过电源电压 V_{CC}，它的最小值不会小于零。在电压比较器中一般 A_0 是很大的，所以当 $V_{i_1} - V_{i_2} > 0$ 时，V_0 就趋向电源电压 V_{CC}，当 $V_{i_1} - V_{i_2} < 0$ 时，V_0 就趋向零。我们可以用图 6-27 所示的曲线来表示这种关系。因此，我们可以事先给电压比较器的一个输入端输入一个给定信号，另一个输入端输入一个要求比较的信号，那么我们就可以根据电压比较器输出电压的高低来判

断被比较的电压是大于还是小于给定电压。

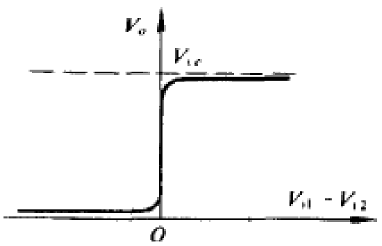


图 6-27 电压比较器输入输出关系

窗口电压比较器用来判断输入信号电压是否落在某一个给定范围之内。在图 6-28 框 Ⅰ 中是用上述两个电压比较器组成的一种窗口电压比较器。图中 CO_1 和 CO_2 是二只电压比较器，电阻 R_1、R_2 和 R_3 组成分压器，产生二个分压电压分别作为 CO_1 和 CO_2 的给定电压，发光二极管 LED_1 和 LED_2 分别用来指示 CO_1 和 CO_2 输出电位高低，当输出是低电位时 LED 就发光，反之就不发光。

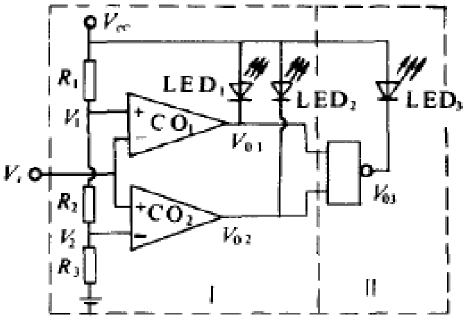


图 6-28 窗口电压比较器

现在我们讨论它的工作情况。当 $V_i > V_1 > V_2$ 时，CO_1 的输出是低电位，CO_2 的输出是高电位，所以 LED_1 发光，LED_2 不发光。当 $V_2 < V_i < V_1$ 时，CO_1 的输出为高电位，CO_2 的输出仍然是高电位，所以 LED_1 和 LED_2 都不发光。当 $V_i < V_2 < V_1$ 时，CO_1 的输出仍为高电位，而 CO_2 的输出转为低电位，所以 LED_1 仍然不发光，LED_2 发光。因此，可以用图 6-29(*a*)表示两个 LED 指示的窗口电压比较器的工作情况，即 LED_1 发光表示输入信号太大，LED_2 发光表示输入信号太小，两个 LED 都不发光表示输入信号合适。这个电路可以用作两个跳灯显示的半自动曝光量控制电路。

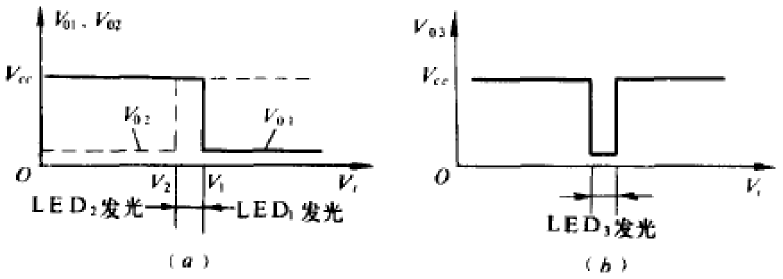


图 6-29 LED 发光情况

只要在上述的电路输出端加接一个有两个输入端的与非门电路控制另一只 LED(图 6-28 中框 Ⅱ)就成为一种三个跳灯显示的半自动曝光量控制电路。

与非门电路是一种逻辑判断电路。当它的所有输入端(在这里是两个输入端)都是高电位时，它的输出端为低电位(在这里 LED_3 就发光，)只要全部输入端中有一个输入端是低电位，它的输出端就为高电位(在这里 LED_3 就不发光)。因此在这个电路中，只有窗口电压比较器的输入电压 V_i 落在给定电压 V_1 和 V_2 之间时，它的两个输入端都是高电位(CO_1 和 CO_2 的输出电位)，它的输出才是低电位，LED_3 发光；输入电压 V_i 在其它值时，它的两个输入端总是有一个是低电位，所以它的输出端是高电位，LED_3 不发光，而 LED_1 和 LED_2 中有一个发光。它们的关系可以用图 6-29(*a*)和(*b*)表示。如果 LED_1 和 LED_2 采用红色的发光二极管，LED_3 采用绿色发光二极管，那么这种电路的显示就很醒目，绿色 LED_3 发光就表示输入信号合适，红色的 LED_1 发光表示输入信号太大，红色的 LED_2 发光表示输入信号太小。图 6-28 中除了其中的发光二极管以外，其它的电路一般都是作成一块集成电路片，体积很小，完全能装在照相机内部。

以上介绍的只是一种典型的发光二极管跳灯指示型半自动控制曝光量的电路。根据使用要求，各种型号的半自动控制曝光量集成电路在其基础上加以简化或扩展。BW-Ⅱ 照相机专用

集成电路就是与上面介绍的窗口电压比较器工作原理相近的一种集成电路。

图 6-30 是 BW-Ⅱ 集成电路的一种最基本的用法，它的曝光参数完全由测光系统引入。

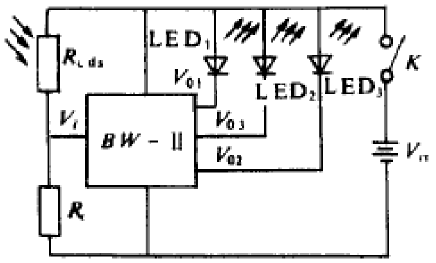


图 6-30 定点式测光电路

为了用小孔光阑片引入曝光参数 S，在有透镜的外测光系统中，可以把各小孔的直径 d 作成与曝光参数有以下关系

$$d = M \cdot 2^{SV/2} \tag{6-24}$$

其中 M 为比例常数。

为了用可变透光率的减光片引入程序快门的曝光参数（或通过机械加法机构分别引入快门和光圈的曝光参数），可以把减光片的透光率 τ 作成与曝光参数有以下关系

$$\tau = M' \cdot 2^{-(AV+TV)} \tag{6-25}$$

其中 M' 为比例常数。

根据(6-14)式；被摄景物的平均亮度 L 可以表示为

$$L = 0.30K \cdot 2^{BV} \tag{6-26}$$

由透镜系统像面平均照度的关系式，以及(6-24)、(6-25)和(6-26)式可以得到光敏面的平均照度 E 为

$$E = E_0 \cdot 2^{BV+SV-(AV+TV)} \tag{6-27}$$

其中 E_0 为常数

将(6-17)式改写成

$$R_2 = R_1 E_1^{\gamma} E_2^{-\gamma} = R_0 E_2^{-\gamma}$$

其中 R_0 为常数。

对任意一个 E 值，可以有

$$R_{Cds} = R_0 E^{-\gamma} \tag{6-28}$$

将(6-27)式代入(6-28)式可以得到光敏电阻 R_{Cds} 与各曝光参数的关系为

$$R_{Cds} = R_0 E^{-\gamma} = R'_0 E^{-\gamma(BV+SV-AV+TV)} \tag{6-29}$$

其中 R'_0 为常数。

根据图 6-30，窗口电压比较器的输入电压 V_i 为

$$V_i = \frac{V_{CC} R_C}{R_C + R_{Cds}} = \frac{V_{CC} R_C}{R_C + R'_0 \cdot 2^{-\gamma(BV+SV-AV+TV)}} \tag{6-30}$$

如果我们把窗口的上限电压 V_1 和下限电压 V_2 的中间值 V_n 作为指示合适曝光量绿色 LED_3 发光的名义值

$$V_n = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

那么在曝光量合适(BV＋SV＝AV＋TV)时，调节调整电阻 R_C 使得

$$V_i = V_n = \frac{V_{CC} R_C}{R_C + R'_0} \tag{6-31}$$

成立，绿色 LED_3 发光，指示曝光量合适。由(6-31)式可得

$$R_C = \frac{V_n R'_0}{V_{CC} - V_n} \tag{6-32}$$

将(6-32)式代入(6-30)式就可以得到经调整后的窗口电压比较器的输入电压与各曝光参数的关系式

$$V_t = \frac{V_{CC}V_n}{V_n + (V_{CC} - V_n)\cdot 2^{-\gamma(SV+BV-AV-TV)}} \tag{6-33}$$

从公式(6-33)可以看出，当 $V_t=V_n$ 时，由减光片引进去的 AV 和 TV 才能满足 SV+BV=AV+TV 的条件，即调节到合适曝光量值。但是窗口电压比较器是只要 V_t 落在 V_1 和 V_2 两电压值之间就能使绿色 LED_3 发光。所以绿色 LED_3 发光时仍可能存在一定的曝光误差。当然 V_1 和 V_2 的差值越小，即窗口宽度越小，可能引起的曝光误差就越小。但是窗口宽度不能太小，否则给测光带来一定的困难，即很难把减光片恰好拨到使绿色 LED_3 发光的位置。因此，只要使窗口宽度与其它参数配合把曝光误差控制在要求范围内就行了。

一个集成电路窗口电压比较器在不用外接电阻调节的情况下，它的窗口宽度基本是固定的，我们可以根据它的上、下限电压 V_1 和 V_2 计算出窗口的宽度引起的曝光量误差。

假设当 $V_t=V_1$ 和 $V_t=V_2$ 时为绿色 LED_3 能发光的边界，那么根据(6-33)式有

$$V_1 = \frac{V_{CC}V_n}{V_n + (V_{CC} - V_n)\cdot 2^{-\gamma(SV+BV-AV-TV)}}$$

和
$$V_2 = \frac{V_{CC}V_n}{V_n + (V_{CC} - V_n)\cdot 2^{-\gamma(SV+BV-AV-TV)}}$$

简化以上两式可得

$$\Delta EV = -\frac{1}{\gamma}\log_2\left(\frac{V_{CC} - V_1}{V_{CC} - V_n}\frac{V_n}{V_1}\right) \tag{6-34}$$

和
$$\Delta EV = -\frac{1}{\gamma}\log_2\left(\frac{V_{CC} - V_2}{V_{CC} - V_n}\frac{V_n}{V_2}\right) \tag{6-35}$$

其中　ΔEV=SV+BV−AV−TV。

由以上两式可以计算出窗口宽度可能引起的最大曝光量误差 ΔEV，也可以由给定这部分允许的最大曝光量误差 ΔEV 计算出可采用的光敏电阻的 γ 值的最小值。

在曝光参数全部由测光系统引入的半自动控制曝光量的电路中，当照相机被调节到合适曝光量(BV+SV=AV+TV)时，由公式(6-27)可以看出，这时测光元件上的照度

$$E = E_0 2^{BV+SV-(AV+TV)} = E_0$$

所以，对于这种曝光参数全部由测光系统引入的控制电路，在合适曝光时，光电元件上受到的照度是一个定值，即光电元件的工作点是一个定值(由于比较器窗口有一定的宽度，所以实际上有微小变动)。一般称它为定点式测光。在定点式测光中，由于测光元件上的光照度是在很小的范围内变动，所以对它的光电参数线性度就没有严格的要求，这是定点式测光的优点。

定点式测光要求曝光参数全部从测光系统引入。但是，由于各种原因，有些照相机不宜或不能采用这种曝光参数引入方法(例如单镜头反光照相机)，而只能把一部分曝光参数由函数电位器直接引入电路(如图 6-31)。这样，随着摄影景物亮度 L 的不同，测光元件受到的照度 E 是变动的，即测光元件的工作点随摄影景物亮度 L 的变化而变动。一般称这种测光为动点式测光。由于动点式测光中元件的工作点是在一个较大的范围内变动的，因此对该范围内测光元件的光电参数的线性度必须有一定的要求，因为它直接影响着测光精度。

图 6-31 是把 BW-Ⅱ 照相机专用集成电路接成动点式测光的半自动控制曝光量电路。在这个电路中，摄影景物亮度和底片感光度从测光系统引入，而光圈数和快门的曝光时间则通过机械加法机构从函数电位器 $R_{A\cdot T}$ 引入。因此有

$$R_{CdS} = R_0 \cdot 2^{-\gamma(BV+SV)} \qquad (6\text{-}36)$$

其中 R_0 为常数。

并且把 $R_{A \cdot T}$ 设计成

$$R_{A \cdot T} = R'_0 \cdot 2^{-\gamma'(AV+TV)} \qquad (6\text{-}37)$$

式中 R'_0 为常数；γ' 为函数电位器的 γ 值。

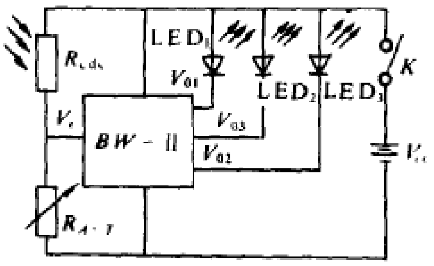


图 6-31 动点式测光电路

根据图 6-31，窗口电压比较器的输入电压为

$$V_i = \frac{V_{CC} R_{A \cdot T}}{R_{CdS} + R_{A \cdot T}}$$

或

$$\frac{R_{CdS}}{R_{A \cdot T}} = \frac{V_{CC} - V_i}{V_i}$$

当 $V_i = V_n$ 时，绿色 LED_3 发光，指示曝光量合适

$$\frac{R_{CdS}}{R_{A \cdot T}} = \frac{V_{CC} - V_n}{V_n} = k$$

将(6-36)和(6-37)式代入上式中

$$k = \frac{R_{CdS}}{R_{A \cdot T}} = \frac{R_0 \cdot 2^{-\gamma(BV+SV)}}{R'_0 \cdot 2^{-\gamma'(AV+TV)}} \qquad (6\text{-}38)$$

取对数，并经整理后有

$$\log_2 k \cdot \frac{R'_0}{R_0} = \gamma'(AV + TV) - \gamma(BV + SV)$$

因此，若能保证 $R'_0 = R_0/k$ 和 $\gamma' = \gamma$，那么上式就与曝光方程(BV+SV=AV+TV)完全一致了，即控制电路完全能正确地控制曝光量。

由于这种电路也是以窗口电压比较器为核心的，所以与定点式测光一样，窗口的宽度会引起曝光误差，其关系式与(6-34)和(6-35)式相同，即为

$$\Delta EV = -\frac{1}{\gamma} \log_2 \left(\frac{V_{CC} - V_1}{V_{CC} - V_n} \frac{V_n}{V_1} \right)$$

$$\Delta EV = -\frac{1}{\gamma} \log_2 \left(\frac{V_{CC} - V_2}{V_{CC} - V_n} \frac{V_n}{V_2} \right)$$

因此动点式测光电路也存在由给定这部分允许的曝光误差选取光敏电阻最小 γ 值的问题。

上面提到，只有在 $\gamma = \gamma'$ 等于设计值时，这种电路才能正确地控制曝光量。这在实际生产中是不易达到的，因为光敏电阻的 γ 值的离散性很大，而且同一个光敏电阻在不同的工作点，其 γ 值也有差异。但是 $\gamma' \neq \gamma$ 和设计值时，我们总是可以在某个工作点进行校正，使其不存在曝光误差。例如我们取某个工作点 $EV_C = BV_C + SV_C = AV_C + TV_C$，在这一点通过变动校正滤光片来改变 R_0 值，使得 $\gamma' \neq \gamma$ 情况下在 EV_C 点(6-38)式仍成立，即绿色 LED 发光，曝光没有误差。在校正点光敏电阻的阻值为

$$R_{CdSc} = R_0 \cdot 2^{-\gamma(BV_C + SV_C)} = R_0 \cdot 2^{-\gamma EV_C}$$

与(6-36)式比较，得

$$\frac{R_{CdS}}{R_{CdSc}} = 2^{\gamma(BV_C + SV_C - BV - SV)}$$

$$= 2^{\gamma(EV_C - EV)}$$

对上式求导数，可得 γ 的偏差与曝光误差之间的关系

$$d\gamma = \frac{\gamma dEV}{EV_C - EV} \quad 或 \quad \Delta\gamma = \frac{\Delta EV}{EV_C - EV}$$

一般校正点是取在工作范围的中间点，因此可以根据远离校正点 EV_C 的工作点 EV、γ 值的设计值以及分配给因 γ 值的偏离而引起的曝光量误差 ΔEV，由上式计算出允许 γ 值的最大偏离量 $\Delta\gamma$。

BNC—3 是一种为单镜头反光照相机设计的半自动曝光量控制专用集成电路。它与外围元件的连接如图 6-32 所示。图中虚线框部分为 BNC—3 内部原理框图，由于它的两个电压比较器的接法与典型的窗口电压比较器的接法略有差别，所以它的输出部分的接法与典型电路也有些不同。外接元件中 R_L 为 R_{Cds1}、R_{Cds2}、R_8 和 R_9 的串并联电路的等值电阻，由它引入摄影景物亮度。R_F、R_T 和 R_S 分别是引入光圈数、快门速度和底片感光度参数的函数电位器。由 R_1、R_2、R_3 和 R_4 建立窗口电压的上限和下限。窗口的宽度可以通过 R_1 和 R_3 进行调节。R_5、R_6 和 R_7 为 LED 的限流电阻。

下面我们分析一下这个电路的工作原理。当电路引入的曝光参数使得 $V_t > V_1 > V_2$ 时，CO_1 和 CO_2 输出都为低电平，红色 LED_1 发光，LED_2 和 LED_3 不发光，指示曝光量过度。当引入的曝光参数使得 $V_t < V_1 < V_2$ 时，CO_1 和 CO_2 输出都为高电平，红色 LED_3 发光，LED_1 和 LED_2 不发光，指示曝光量不足。只有在电路引入的曝光参数使得 $V_1 > V_t > V_2$ 时，CO_1 输出高电平和 CO_2 输出低电平，绿色 LED_2 发光，LED_1 和 LED_3 不发光，指示曝光量合适。

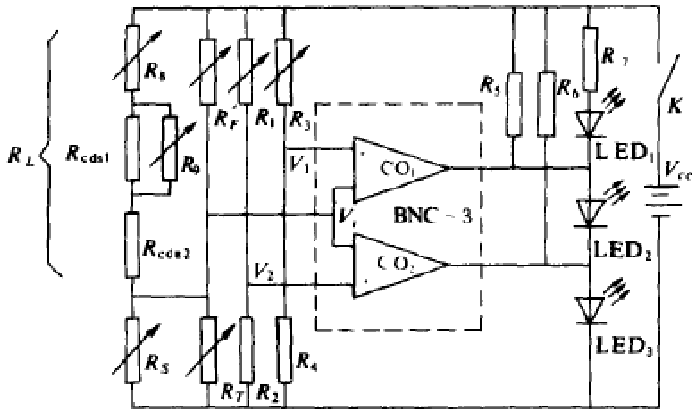


图 6-32　BNC—3 控制电路

由图 6-32 电路可以看出，R_L、R_F、R_T、R_S 与 V_t 有以下关系

$$\frac{1/R_T + 1/R_S}{1/R_L + 1/R_F} = \frac{V_{CC} - V_t}{V_t} \tag{6-39}$$

设 V_n 为比较器窗口电压的中间值，当 $V_t = V_n$ 时，绿色 LED_2 发光，表示曝光量合适。所以在曝光量控制合适时(6-39)式可以表示成

$$\frac{1/R_T + 1/R_S}{1/R_L + 1/R_F} = \frac{V_{CC} - V_n}{V_n} = k$$

或

$$k/R_F - 1/R_T = 1/R_S - k/R_L \tag{6-40}$$

而曝光量合适时，又有

$$AV + TV = BV + SV \tag{6-41}$$

比较(6-40)和(6-41)两式，可以看出，AV、TV、BV 和 SV 与 R_F、R_T、R_L 和 R_S 之间存在倒数关系。首先，设

$$R_F = \frac{1}{a_1 + b_1 AV}，\quad R_L = \frac{1}{a_2 + b_2 BV}$$

$$R_S = \frac{1}{a_3 + b_3\mathrm{SV}}，\quad R_T = \frac{1}{a_4 + b_4\mathrm{TV}}$$

其中 a_1、a_2、a_3、a_4、b_1、b_2、b_3 和 b_4 为待定系数。将上述四式代入(6-40)式得

$$kb_1\mathrm{AV} - b_4\mathrm{TV} = -kb_2\mathrm{BV} + b_3\mathrm{SV} + (a_3 + a_4) - k(a_1 + a_2)$$

从上式看出，只有当

$$a_3 + a_4 = k((a_1 + a_2) \text{ 和 } kb_1 = -kb_1 = b_3 = -b_4$$

上式就与(6-41)式就完全一致。这说明电路元件完全按照上述要求设计时，电路是能正确地控制曝光量的。在这电路中 R_L 由两个光敏电阻和两个调整电阻串并联组成的目的就是为了尽量满足其与曝光参数的倒数关系的要求。

前面讨论过的几种半自动控制曝光量的电路采用的测光元件都是硫化镉光敏电阻。由于硫化镉光敏电阻的线性度较差，虽然有时采用复合光敏电阻等措施，但仍不能满足大范围的测光要求。所以在要求测光范围大的照相机都采用线性度高的 SPD 光电元件。

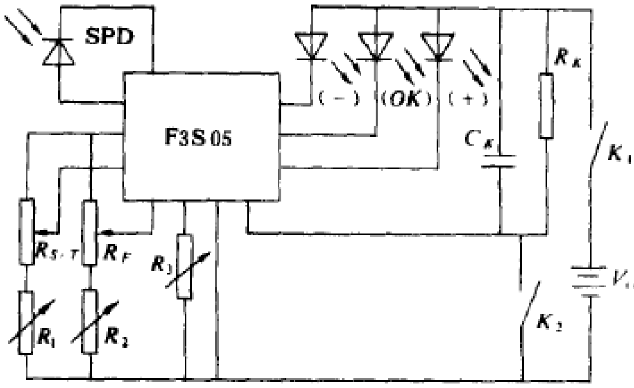


图 6-33 SPD 测光控制电路

F3S05 是专为 SPD 光电元件配套使用的半自动控制曝光量的照相机专用集成电路。图 6-33 是其应用电路。为了适应 SPD 的微弱电流的光电信号的放大，集成电路中与 SPD 连接的是由一对 MOS 管组成的差动放大器，它的输入阻抗可以达到 $10^{12}\Omega$。光电信号与光圈、快门以及底片感光度等信号经运算后，由窗口电压比较器控制 LED 指示曝光参数是否符合要求。电路中的 R_K 和 C_K 是集成电路内部电源开关的延时元件。在电路的总开关 K_1 接通后，按下 K_2，电容 C_K 瞬间被充满电，使得内部电源接通，可以测 光。C_K 经 R_K 不断放电，经 10 秒钟后，内部电源被关断。所以每按一次 K_2 能测光 10 秒钟，起到方便测光和节电的作用。

§6-5 自动控制曝光量的基本原理

自动控制曝光量的照相机也像半自动控制曝光量的照相机一样，早期是用微型电流表控制的，随着晶体管和集成电路的发展，目前几乎都是采用电子电路控制的。

6-5.1 微型电流表自动控制曝光量的基本原理

用微型电流表自动控制曝光量是在用微型电流表半自动曝光量的基础上发展起来的。在半自动控制曝光量方式的照相机中，电流表的指针的位置主要是给摄影者显示他所拨动的曝光装置(快门或光圈)的参数调节圈是否到了合适的位置。在自动控制曝光量的照相机中，电流表的指针在指示曝光参数的同时，还通过一定的机构确定曝光参数调节装置的位置，如光圈调节机构的位置或快门速度调节机构的位置，从而实现曝光量的自动控制。

在自动控制曝光量照相机中的微型电表控制电路的基本电路与半自动控制曝光量照相机中的基本电路(图 6-21)相似。在这个基本电路中曝光参数完全通过测光系统引入，如果把图 6-21(b)电路中的调整电阻 R_2 换成一个函数电位计(或分档电阻群)，同样能通过它引入部分曝光参数。

图 6-34 是一种自动光圈照相机的光圈控制机构的原理图。在这照相机中它的曝光参数 t 和 S 是通过测光系统中的小孔光阑片 2 引入的，因此这个照相机的电表控制电路与图 6-21(b) 相似。

如图所示，快门速度调节圈 20 和感光度调节圈 22 组成一个差动机构，共同控制着小孔光阑片的位置。当转动快门速度调节圈时，不但使快门调速阶梯板 21 转动，改变快门的曝光时间，而且带动感光度调节圈和小孔光阑片一起转动，把大小不同的孔引进测光系统；然而，当转动感光度调节圈时，却不能带动快门速度调节圈，只能带动小孔光阑片转动，因此，转动感光度调节圈的结果改变了它的刻度和快门速度调节圈的刻度之间的相互位置。当摄影者按这两个调节圈的刻度分别装定胶卷的感光度和快门的有效曝光时间时，就通过这个差动机构确定了小孔光阑片的正确位置，也就是使进入测光系统限制光敏电阻光敏面照度的小孔面积对应于这两个曝光参数的组合值，在加法系统中就是感光度值 SV 和时间值 TV 之差。

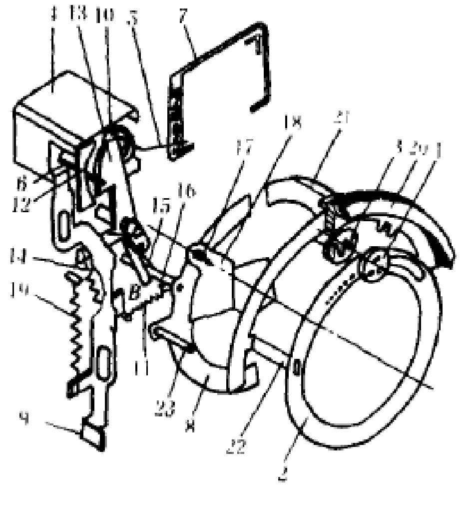


图 6-34　自动光圈原理图

由于用这种差动方法装定曝光参数 S 和 t，所以小孔光阑片的各孔位的等效小孔孔径 d 应符合

$$d = M \cdot 2^{(\mathrm{SV}-\mathrm{TV})/2}$$

当摄影者把照相机对准平均亮度为 L 的被摄景物时

$$L = 0.30K \cdot 2^{\mathrm{BV}}$$

可以得出测光系统中光敏电阻光敏面的平均照度 E 为

$$E = M' \cdot 2^{\mathrm{BV}+\mathrm{SV}-\mathrm{TV}} = M' \cdot 2^{\mathrm{AV}}$$

代入光敏电阻的阻值公式(6-28)中，有

$$R_{CdS} = R_0 E^{-\gamma} = R'_0 \cdot 2^{-\gamma \mathrm{AV}}$$

式中 R'_0 为常数。

根据图 6-21(b)所示的电路，流过电流表的电流 I_a 为

$$I_a = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_t + R_{CdS}\left(\dfrac{R_1 + R_t}{R_2} + 1\right)}$$

$$= \frac{V_{CC}}{R_1 + R_t + R'_0 \cdot 2^{-\gamma \mathrm{AV}}\left(\dfrac{R_1 + R_t}{R_2} + 1\right)} \tag{6-42}$$

其中 R_t 为电流表内阻。

从(6-42)式可以看出，流过电流表的电流是 AV 的函数，即 $I_a = f(\mathrm{AV})$。由于电流表指针的转角 α_a 与流过它的电流 I_a 有关，所以有 $\alpha_a = f'(\mathrm{AV})$。因此，这时电流表指针的转角 α_a 表示着为使底片获得合适的曝光量需要的光圈数的大小。在照相机的取景器中，摄影者可以看到电流表指针 5 指示出这个光圈数的值。

电流表的指针虽然能指示出摄影时所需要的光圈数，但这种微型电流表指针的力矩太小，不能直接带动光圈机构，把光圈拨到所指示的光圈数。光圈的拨动完全靠摄影者在按快门释放杆时，由快门释放杆带动，但是与电流表指针联动的卡针的位置限制了光圈能拨动的范围，即

确定了光圈被拨到的光圈数。其工作过程如下：

在起始状态，光阑动圈 8 在拉簧 11 的作用下使光圈处于最大孔径，光阑动圈上的连动杆 16 使阶梯板 10 和卡板 13 脱离卡针 6。因此，与电流表指针 5 联动的卡针 6，在测光时可以随指针 5 自由地转到与所需光圈相对应的位置。当摄影者按下快门释放杆 9 时，快门释放杆通过拉簧 14，克服扭簧 15 和拉簧 11 的力矩，使卡板首先夹住卡针，随后阶梯板夹住卡针，阶梯板的 B 端就通过连杆 16 使光阑动圈 8 转动，光阑动圈上的销钉 17 就使光阑叶片转动。由于卡针 6 的位置决定了阶梯板 10 的转角，所以通过连杆 16、光阑动圈 8 和销钉 17 也就决定了光阑叶片围成的孔的大小。当快门释放杆继续按下时，上好弦的快门就动作，完成曝光。当释放快门释放杆后，在拉簧 19 的作用下，快门释放杆以及光阑和阶梯板等各自复位等待下一次曝光。

从以上所举的用微型电流表控制的自动光圈的例子可以看出，半自动和自动控制曝光量的照相机中都可以采用微型电流表，但是在自动控制曝光量的照相机的电流表中，有一根与电流表针联动的卡针，通过卡针、阶梯板等零部件来确定光圈收缩的范围，从而自动地控制了光圈的大小。当然这种方法也有用来控制程序快门的。由于微型电表的装配困难和易损坏等弱点，目前有的光圈的自动控制采用类似预缩光圈的原理，当光圈收缩到合适大小时，由一个电磁铁（而不是预缩光圈的导板）来锁定它，有的是采用特殊的微型电动机带动光圈的动环转到合适的位置。

6-5.2 模拟电子电路自动控制曝光量的基本原理

由于半导体晶体管的出现，不用微型电流表的小型电子电路才有可能装在照相机中自动控制曝光量。其中用得最早的是模拟电子电路。随着大规模集成技术的发展，目前已把数字电路和微机也用到照相机的曝光量控制技术中了。下面我们先介绍中低档照相机中用得比较多的模拟电子电路自动控制曝光量的基本原理。

模拟电子电路是以延时电路型式出现在自动控制曝光量系统中的，所以它适用于控制光圈优先的电子快门以及程序快门中。

图 6-35 是一种用简单的电子延时电路控制的电子快门原理图。快门的曝光时间 t 是由晶体三极管 BG_1、BG_2 以及电阻 R_1、、R_2、R_3 和电容 C 等元件组成的延时电路控制的。快门上紧后，挡片 V_1 关闭通光孔，并且拉簧 S_4 通过杠杆 P_1 的右端把挡片 V_1 钩在关闭通光孔状态，同时杠杆 P_1 的凸阶 y 使杠杆 P_2 的右端钩住挡片 V_2。这时由于开关 K_1 断路，所以延时电路尚未开始工作。

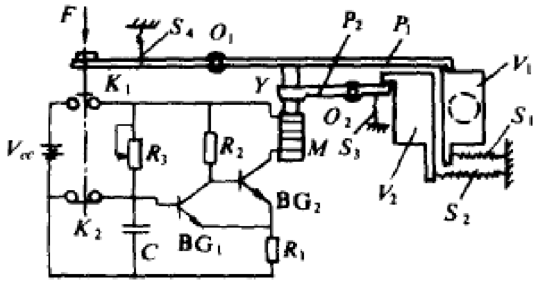


图 6-35 简单的电子快门原理图

当要摄影曝光时，就在 F 方向按下快门释放按钮，使杠杆 P_1 绕 O_1 轴转动，它的右端就释放快门挡片 V_1、V_1 在动力弹簧 S_1 的作用下打开通光孔，曝光开始。同时凸阶 y 也离开杠杆 P_2，但是 P_2 的位置不变。这是因为在快门按扭按下后，开关 K_1 由断开状态转变为接通状态；开关 K_2 由接通状态转变为断开状态，所以延时电路就开始工作。由于快门释放时 K_2 刚断开，在这瞬间电容器 C 的两端电压还没有建立，因此由晶体管 BG_1、BG_2 等组成的施密特电路处在 BG_1 截止和 BG_2 导通状态，电磁铁 M 的绕组就有电流流过，产生磁力把杠杆 P_2 吸住。

电容器 C 和可变电阻器 R_3 组成充电回路，电容器两端的电压充到某个预定的电压 V_p 所

需要的时间 t 可以通过可变电阻器 R_3 来调节。随着时间的增长，电容器两端的电压 V_c 就不断地增加。当 V_c 增加到预定的 V_p 值时，施密特电路就发生"翻转"，即原来截止的 BG_1 管由截止变为导通，而原来导通的 BG_2 管变为截止。因此，电磁铁 M 就断电失去磁力。杠杆 P_2 在拉簧 S_3 的作用下绕 O_2 轴转动，它的右端将挡片 V_2 释放。挡片在动力簧 S_2 的作用下关闭通光孔，曝光就结束。

从上述例子看出电子快门的曝光时间调节不象一般机械快门那样是分档的，而是可以无级调节的，电路的延时时间可以作得比较长，所以电子快门的曝光时间可以在比较宽的范围内调节，长达几十秒。如果我们用测光系统中的光敏电阻来代替上述电路中的可变电阻器 R_3，那么上述电子快门的曝光时间就会随着被摄景物平均亮度变化而变化。这样这个电子快门就成了 一个简单的能自动控制曝光量的电子快门。所以一般所称的电子快门实际上就是用电子电路控制曝光时间的机械快门。

一、时间-电压转换电路

电子快门电路是一种控制快门关闭时间的电路，因此在模拟控制电路中一定要将时间量与电量联系起来，电路才能进行处理和控制快门的关闭。所以在模拟控制电路中必须要有一个时间-电压转换电路。在模拟电路中用得最多的是利用电容器在充电或放电过程中电容器两端的电压与充电或放电时间的关系把时间量与电量联系起来的。下面我们分析电子快门中用得较多的三种主要电路。

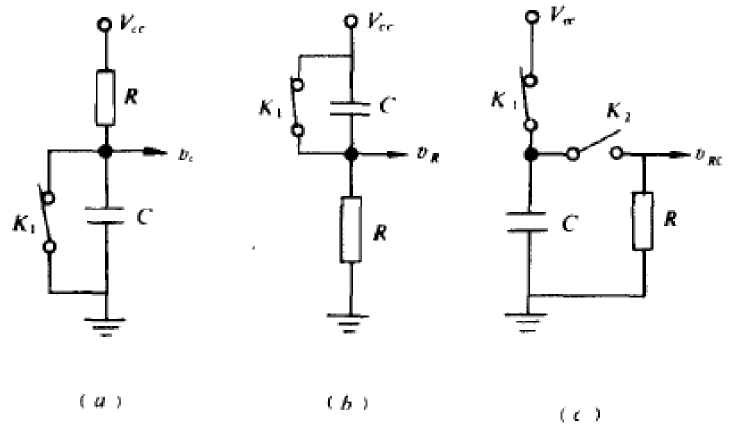


图 6-36　RC 充放电电路

1. RC 充放电电路　RC 充放电电路一般有图 6-36 所示的三种接法。在自动控制曝光量的电子快门电路中，为了自动引入曝光参数 L，RC 电路中的电阻 R 就采用光敏电阻了。

图 6-36 中的开关 K_1、K_2 是处在初始状态。当快门打开曝光时，开关 K_1 就断开，K_2 就接通。这三种电路在开始工作后，时间 t_e 与电压 v 之间的关系分别为

$$\begin{cases} v_c = V_{CC}(1 - e^{-t_e/RC}) & (6\text{-}43, a) \\ t_e = -RC\ln(1 - V_C/V_{CC}) & (6\text{-}44, a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_R = V_{CC}e^{-t_e/RC} & (6\text{-}43, b) \\ t_e = -RC\ln(v_R/V_{CC}) & (6\text{-}44, b) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{RC} = V_{CC}e^{-t_e/RC} & (6\text{-}43, c) \\ t_e = -RC\ln(v_{RC}/V_{CC}) & (6\text{-}44, c) \end{cases}$$

我们以图 6-36(a)的电路为例(以后各部分也以这电路作为分析讨论的例子)，用曲线图(图 6-37)的形式来表示各参数之间的关系。从曲线图可以看出：达到同一 v_C 值，电路的时间常

数($\tau=RC$)不同，所需要的时间 t_e 是不相同的；时间常数($\tau=RC$)相同的电路，达到不同的 V_C 值，所需要的时间也是不相同的。因此，我们在快门电路中，可以采用两种方法来控制快门曝光时间。第一种方法是只改变 RC 回路的参数(例如通过测光系统，把一切要引入的参数都集中到改变光敏电阻的阻值)；第二种方法是既改变 RC 回路的参数(例如通过测光系统引入曝光参数 L)，也改变 RC 回路要达到的 v_C 值。

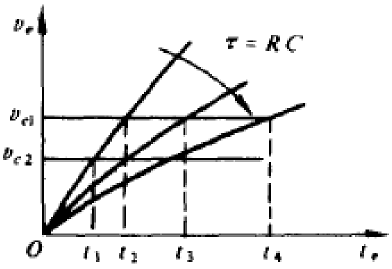


图 6-37　RC 充电曲线

2. 电容电流源充电电路　图 6-38 是电流源电容充电电路的原理图。图中 K 在初始状态是闭合的。当快门开始曝光时，K 打开，电容开始充电。由于充电电流是 i_s，所以 v_c 与充电电流的关系为

$$v_c=\frac{1}{C}\int_0^{t_e} i_S \mathrm{d}t \tag{6-45}$$

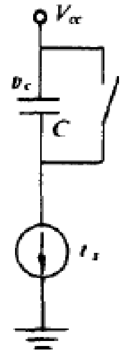


图 6-38　电容电流源充电电路

电流源的电流 i_S 值可以设计成受测光元件 SPD 等控制，也可以设计成是恒定值 I_S。当 i_S 为恒定值 I_S 时

$$v_c=\frac{1}{C}I_S t_e \tag{6-46}$$

或

$$t_e=\frac{C}{I_S}v_c \tag{6-47}$$

因此，在工作范围内，v_c 是随 t_e 线性上升的(见图 6-39)，而且其上升的速率随 I_S 增大而加快。另外，在相同的 I_S 的情况下，达到不同的 v_c 值所需的时间是不同的。所以，我们可以用改变 I_S 或改变电容充电所达到的 v_c 值来控制曝光时间。

3. 对数压缩电容充电电路　在一般模拟电路中，都是利用半导体二极管的正向伏安特性对电信号进行对数压缩处理的。半导体二极管有图 6-40 所示的理想正向伏安特性，它的表达式为

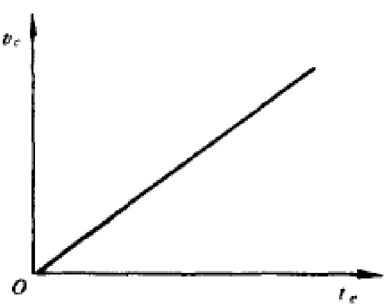


图 6-39　电容电流源充电曲线

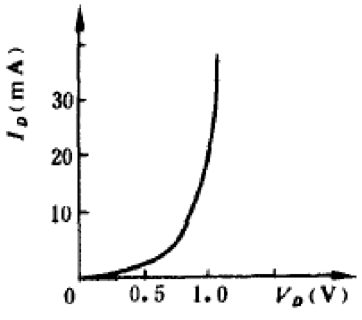


图 6-40　二极管正向伏安物性曲线

$$I_D=I_S(\mathrm{e}^{V_D/V_T}-1)$$

其中 I_D 为流过二极管的电流，I_S 为反向饱和电流，V_D 为二极管两端的电压，V_T 为温度电压当量，在常温下，$V_T\approx 26\mathrm{mV}$。当 V_D 大于 V_T 几倍时，式中的 $\mathrm{e}^{V_D/V_T}\gg 1$，第二项略去，这时上式就成为

$$I_D=I_S\mathrm{e}^{V_D/V_T}\quad 或\quad V_D=V_T\ln(I_D/I_S)$$

即二极管两端的电压 V_D 与流过二极管的电流 I_D 成对数关系。这就是用半导体二极管进行对数压缩的基本原理。有时为了使对数压缩后的输出电压大一些，就用 n(一般 $n=2\sim3$)个二极

管串联在一起使用，这时上式就成为

$$I_D = I_S e^{V_D/nV_T} \qquad (6\text{-}48)$$

$$V_D = nV_T \ln(I_D/I_S) \qquad (6\text{-}49)$$

对数压缩电容充电电路如图 6-41 所示。快门打开前，K 是闭合的。快门开始打开后，K 打开，电容开始充电，它的充电电流为

$$i_D = C\frac{dv_c}{dt} = C\frac{d(V_{CC} - v_D)}{dt} = -C\frac{dv_D}{dt}$$

由于充电电流等于流过二极管的电流，所以有

$$-C\frac{dv_D}{dt} = I_S e^{v_D/nVT}$$

在 $t=0$ 时，$v_D = V_{CC}$ 的初始条件下，可以解得

$$v_D = -nV_T \ln\left(\frac{I_S}{nV_T C}t + e^{-\frac{V_{CC}}{nV_T}}\right) \qquad (6\text{-}50)$$

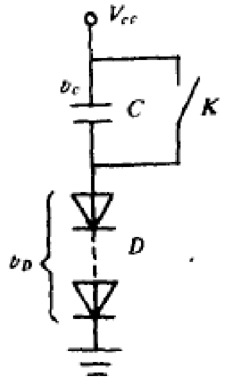


图 6-41　对数压缩电容充电电路

可以适当地选取电路中的各参数值，使得 $v_D = a - b\ln t$ 在使用的 t 范围内与(6-50)式的误差很小，那么就可以用

$$v_D = a - b\ln t_e$$

代替(6-50)式，这时 v_D 与 t_e 就成对数关系了。

二、基本电子快门电路

1. 控制电路　从前面的分析知道，当时间-电压转换电路输出的电压达到某个我们称为参考电压值 V_{ref} 时，就达到了需要的曝光时间 t，应该切断快门电磁铁的电流，使电磁铁失去磁力，快门关闭。能起到这种作用的电路可以有许多种，但是从功能来说都可以归结为本章第四节所说的电压比较器。由于在电子快门中控制电路要带动电磁铁，所以这种电压比较器的末级是一个开关驱动电路。这种电压比较器的一般工作原理前面已经分析过了，这里就不再重复。

图 6-42 中虚线框内是一种集成电路的电子快门控制电路的主要部分，外面接了时间-电压转换电路、参考电压设定电路、控制快门的电磁铁 M 以及电源和开关 K 和 N。下面我们分析这个电子快门控制电路的工作过程。

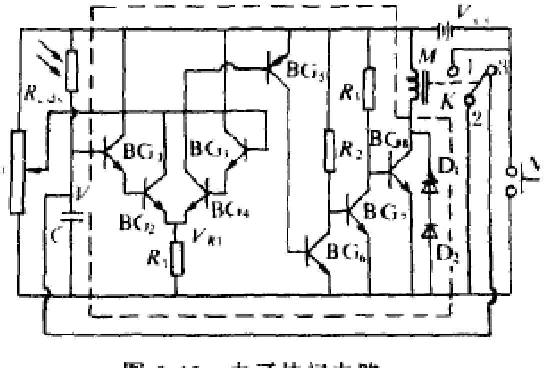


图 6-42　电子快门电路

图所示为这个电子快门电路的起始状态，这时与快门释放杆联动的开关 N 处在断开电源状态，整个电路不工作；开关 K 处在触点 1-2 点断开和 2-3 点接通，使电容器 C 上次充的电荷完全释放完毕。

当按下快门释放杆时，快门打开，曝光开始。与此同时，与快门释放杆联动的开关 N 将电源接通，整个控制电路开始工作。但是，这时电容器 C 还被开关 K 短路，所以晶体三极管 BG_1 的基极处在低电位，晶体管 BG_1 和 BG_2 都处在截止状态，而晶体三极管 BG_3 的基极电位与参考电压 V_{ref} 相等，处在高电位，所以晶体三极管 BG_3 和 BG_4 处在导通状态。由于 BG_4 导通，BG_5 的基极就有基极电流 I_{b5}，BG_5 就导通。BG_5 导通就供给 BG_6 基极电流，使得 BG_6 也导通。BG_6 导通，它的集电极就处在低电位，与 BG_6 集电极相连的 BG_7 的基极也处在低电位，所以 BG_7 截止。BG_7 截止，它的集电极就为高电位，与它相连的 BG_8 的基极也为高电位，所以 BG_8 就导通。

BG_8导通，电磁铁 M 的绕组就有电流通过，所以就产生电磁力，它一方面吸住快门关闭机构，使快门不能关闭，保持曝光状态，另一方面使开关 K 转换成触点 1-2 接通和 2-3 点断开，这样就使电容器 C 解脱了短路状态，并且由开关 K 接替开关 N 使电路接通电源。所以在快门打开瞬间，电容器 C 就开始通过光敏电阻 R_{CdS} 充电。电压 V_C 就随着曝光时间按指数律(6-43,a)增长，它的增长速率与光敏电阻所受到的光照度有关。由于 BG_3 和 BG_4 导通，所以 $V_{R1}=V_{ref}-2V_{be}$。因此，当 V_C 值增长到 $V_C=V_{R1}+2V_{be}=V_{ref}$时，$BG_1$ 和 BG_2 由截止区进入放大区。BG_2 的集电极电流使得 BG_3 的基极电流减少，因此 BG_4 的发射极电流减少。由 R_1 的作用，使得 BG_2 的发射极电流增加，它的集电极电流也就增加，BG_3 的基极电流进一步减少。经过这样一系列的正反馈作用，立刻变成 BG_1、BG_2 导通和 BG_3、BG_4 截止。BG_4 的截止，通过 BG_5、BG_6 和 BG_7 的作用，必然导致 BG_8 的截止。BG_8 截止，电磁铁 M 的绕组就没有电流，失去磁力，快门关闭机构在弹簧力的作用下将快门关闭，曝光结束。电磁铁失去磁力，开关 K 回复到触点 1-2 断开和 2-3 接通，因此整个电路又断电而停止工作，电容器 C 释放掉所充电荷，等待下一次曝光。

我们把这种基本电子快门电路归结成图 6-43 的具有两个输入端的电压比较器。

由于电压比较器有两个输入端，所以有两种引入曝光参数的方式。第一种方式是全部曝光参数都从一个输入端引入(例如通过测光系统，把要引入的曝光参数都集中到改变光敏电阻的电阻值)，而另一个输入端接一个固定的参考电压 V_{ref}，我们称这种方法为单端输入方式。第二种方式是两个输入端分别都用来引入曝光参数，即 V_{ref}作为可变的，用来引入光圈数 F 等，我们称这种输入方法为双端输入方式。

以上我们已经介绍了一个具体的电子快门电路的工作原理。从所述的情况看出，电子快门电路是能够自动控制电子快门的曝光时间的。下面我们讨论这种基本电子快门电路所控制的光圈优先电子快门和电子程序快门的曝光时间是否符合曝光参数方程式。

2. 光圈优先电子快门 为了讨论方便，我们把电子快门的工作特性曲线看成一个等腰梯形(图 6-44)，并且认为电磁铁和快门关闭机构的动作无滞后现象，这样电子快门电路所控制的时间 t_e 就认为是电子快门的有效曝光时间 t，即 $t=t_e$。

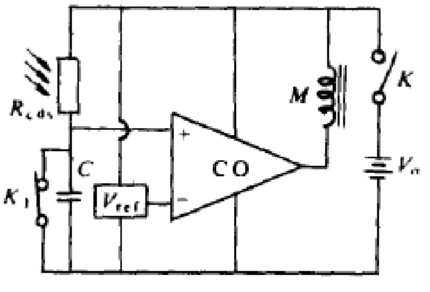


图 6-43 电子快门电路框图

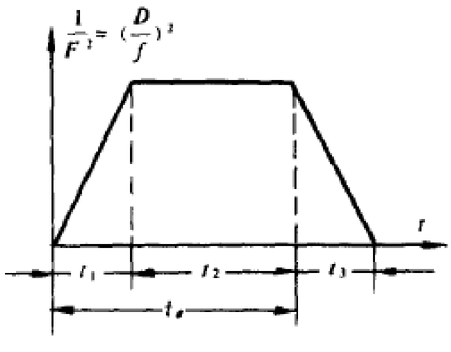


图 6-44 电子快门工作特性曲线

实际电子快门的工作特性曲线当然不会与图 6-44 所示的一致，这种差别所造成曝光时间的误差可以通过使电容器 C 提前充电等方法加以修正。

在单端输入方式中，一般曝光参数都从测光系统引入，因此，光圈优先电子快门测光系统中光敏电阻上的平均照度

$$E = M \cdot 2^{BV+SV-AV}$$

代入光敏电阻的电阻值公式(6-28)中，有

$$R_{CdS} = R_0 E^{-\gamma} = R'_0 \cdot 2^{-\gamma(BV+SV-AV)}$$

再将上式代入(6-43,a)式中的 R，就有

$$t_e = -\ 2^{-\gamma(\mathrm{BV}+\mathrm{SV}-\mathrm{AV})}R'_0C\ln(1 - V_C/V_{CC})$$

当 $V_C=C_{\mathrm{ref}}$时，$t_e=t$，所以上式就成为

$$t = -\ 2^{-\gamma(\mathrm{BV}+\mathrm{SV}-\mathrm{AV})}R'_0C\ln(1 - V_C/V_{CC}) \tag{6-51}$$

或
$$\mathrm{TV}_p = \gamma(\mathrm{BV} + \mathrm{SV} - \mathrm{AV}) - \log_2[-\ R'_0C\ln(1 - V_{ref}/V_{CC})] \tag{6-52}$$

TV_p 是电路所控制快门的实际 TV 值。满足曝光参数方程式的理论值 TV_t 应该等于

$$\mathrm{TV}_t = \mathrm{BV} + \mathrm{SV} - \mathrm{AV} \tag{6-53}$$

TV_t 和 TV_p 与(BV+SV−AV)的关系在直角坐标上是二条直线，如图 6-45 所示，前者的斜率为 1，后者的斜率等于 γ。

从(6-52)式可以看出，只有当光敏电阻 γ 值等于 1 和 $\log_2[-R'_0C\ln(1-V_{\mathrm{ref}}/V_{CC})]=0$，即参考电压 V_{ref}值为

$$V_{\mathrm{ref}} = V_{CC}(1 - \mathrm{e}^{-1/R'_0C})$$

时，TV_p 才能等于 TV_t，即这时电子快门电路所控制的曝光时间就没有误差。因此，单端输入方式的光圈优先电子快门电路要求光敏电阻 γ 值的理论值为 1。

在实际使用中，光敏电阻的 γ 值不可能完全等于 1，那么由于这一原因造成的曝光量误差是多少呢？

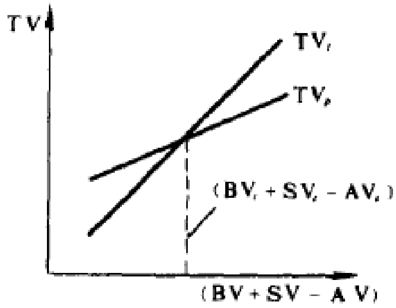


图 6-45　单端输入电子快门 *TV* 曲线

从图 6-45 可以看出，当 $\gamma\neq1$ 时 TV_p 与 TV_t 只有一个重合点，在这一点没有曝光误差，离开这一点越远曝光误差越大。我们可以调节曝光量控制系统中某一个参数，使得这一重合点在我们希望的某点，例如调节 V_{ref}，使重合点在 BV+SV−AV 的中间值 $\mathrm{BV}_C+\mathrm{SV}_C-\mathrm{AV}_C$ 点。将 $\mathrm{BV}_C+\mathrm{SV}_C-\mathrm{AV}_C$ 值代入(6-52)式和(6-53)式，并使二式相等后，可解得

$$V_{\mathrm{ref}} = V_{CC}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{1}{R'_0C}2^{(\gamma-1)(\mathrm{BV}_C+\mathrm{SV}_C-\mathrm{AV}_C)}}) \tag{6-54}$$

将调整后(6-54)式的 V_{ref}值重新代入(6-52)式，得电子快门电路所控制的 TV 实际值

$$\mathrm{TV}_p = \gamma(\mathrm{BV} + \mathrm{SV} - \mathrm{AV}) - (\gamma - 1)(\mathrm{BV}_C + \mathrm{SV}_C - \mathrm{AV}_C) \tag{6-55}$$

(6-55)减(6-53)为电路调整后的曝光误差

$$\Delta\mathrm{EV} = \mathrm{TV}_p - \mathrm{TV}_t = (\gamma - 1)[(\mathrm{BV} + \mathrm{SV} - \mathrm{AV}) - (\mathrm{BV}_C + \mathrm{SV}_C - \mathrm{AV}_C)] \tag{6-56}$$

从(6-56)式看出，为使相机在整个曝光范围内都能正确曝光，必须要求 $\gamma=1$，否则除调整点($\mathrm{BV}_C+\mathrm{SV}_C-\mathrm{AV}_C$)外，都有曝光误差，而且离调整点越远，曝光误差越大。可以由给定的 ΔEV，由下式求出允许的光敏电阻 γ 值的下限

$$\gamma \geqslant 1 - \left|\frac{\Delta\mathrm{EV}}{(\mathrm{BV} + \mathrm{SV} - \mathrm{AV}) - (\mathrm{BV_C} + \mathrm{SV_C} - \mathrm{AV_C})}\right| \tag{6-57}$$

其中(BV+SV−AV)取极限值。

在双端输入方式中，一般测光系统中的光敏电阻只引入曝光参数 L，所以光敏电阻的阻值为

$$R_{CdS} = R''_0 \cdot 2^{-\gamma\mathrm{BV}}$$

代入(6-43,a)式中的 R，并考虑到 $V_C=V_{\mathrm{ref}}$时，$t_e=t$，所以有

$$t = -\ 2^{-\gamma\mathrm{BV}}R''_0C\ln(1 - V_{\mathrm{ref}}/V_{CC}) \tag{6-58}$$

或
$$\mathrm{TV}_p = \gamma\mathrm{BV} - \log_2[-\ R''_0C\ln(1 - V_{\mathrm{ref}}/V_{CC})]$$

$$=\gamma \mathrm{BV} - \log_2 R''_0 C - \log_2 \ln(1 - V_{ref}/V_{CC})^{-1} \quad (6\text{-}59)$$

由于双端输入方式中，SV 和 AV 是通过函数电位计改变 V_{ref} 的大小方式引入的，而且 SV 或 AV 每变化一档，TV_p 也应该变化一档。所以(6-59)式的最后一项为

$$\log_2 \ln(1 - V_{ref}/V_{CC})^{-1} = -(\mathrm{SV} - \mathrm{AV})$$

用这种关系来设计函数电位计。因此，参考电压与引入 *SV* 和 *AV* 有如下关系

$$V_{ref} = V_{CC}\left(1 - e^{-2^{-(\mathrm{SV}-\mathrm{AV})}}\right) \quad (6\text{-}60)$$

将(6-60)式代入(6-59)式，得

$$\mathrm{TV}_p = \gamma \mathrm{BV} + \mathrm{SV} - \mathrm{AV} - \log_2 R''_0 C \quad (6\text{-}61)$$

从(6-61)看出与单端输入方式的情况一样，只有在光敏电阻的 γ 值为 1 和 $R''_0 C = 1$ 情况下，曝光参数方程才能满足，即这时电子快门电路所控制的曝光时间没有误差。

若 γ 值不为 1，那么当 SV 和 AV 一定值时，在直角坐标中 TV_p 和 TV_t 随 BV 的变化呈两条相交的直线(图 6-46)。因此，这时只在交点无曝光误差，离交点越远曝光误差越大。在这种情况中，我们一般可以在光敏电阻前加减光片微调 R''_0 值，把交点调整到我们希望的 BV_c 值的点。在这一点有 $TV_p = TV_t$，所以调整后的 R''_0 值为

$$R''_0 = \frac{1}{C} \cdot 2^{(\gamma-1)\mathrm{BV}_c}$$

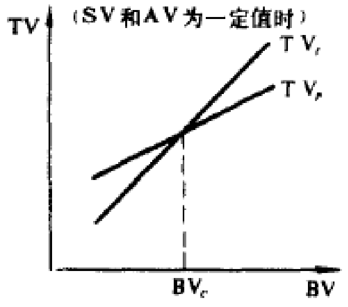


图 6-46 双端输入电子快门 *TV* 曲线

将调整后的 R''_0 值代入(6-61)式，得到调整后的 TV_p 的关系式为

$$\mathrm{TV}_p = \gamma \mathrm{BV} - (\gamma -)\mathrm{BV}_c + \mathrm{SV} - \mathrm{AV} \quad (6\text{-}62)$$

(6-62)式减(6-53)式为调整后的曝光误差

$$\Delta \mathrm{EV} = \mathrm{TV}_p - \mathrm{TV}_t = (\gamma - 1)(\mathrm{BV} - \mathrm{BV}_c) \quad (6\text{-}63)$$

从(6-63)式可以看出，γ 值为 1 时，在整个曝光范围内都没有曝光误差，否则只有在 BV_c 点没有曝光误差，而离 BV_c 点越远曝光误差越大。

当给定这一部分的曝光误差 ΔEV 时，那么光敏电阻 γ 值的下限为

$$\gamma \geqslant 1 - \left|\frac{\Delta \mathrm{EV}}{\mathrm{BV} - \mathrm{BV}_c}\right| \quad (6\text{-}64)$$

其中 BV 取极限值。

因此，基本电子快门电路所控制的光圈优先电子快门测光系统中的光敏电阻 γ 值的理想值为 1。

3. 电子程序快门 程序快门的曝光时间与光圈的大小是事前按一定的规律搭配好的，也就是说，一定的曝光时间对应着一定的光圈大小。如 § 5-3 中所述，程序快门的工作特性可以分为两个阶段：双参数控制段和单参数控制段。在双参数控制段，快门速度和光圈大小同时改变，快门的曝光时间愈长，打开的面积也愈大，对应的 *F* 数愈小，反之，曝光时间愈短，开孔面积愈小，*F* 数则愈大。在单参数控制段，快门的开启面积已增大到成像光束的全部截面积，因此，光圈数值 *F* 不再改变，像面曝光量的继续增大靠延长快门的曝光时间来实现(图 5-37 和图 5-38)。

现在我们要着重分析的是电子程序快门控制电路的参数与它所控制的曝光参数之间的关

系。为了便于讨论，在程序曲线图(图 6-47)上用 P_1 表示双参数控制段，P_2 表示单参数控制段，这两段程序曲线的 γ 值分别为

$$\gamma_{p1}=\frac{dTV}{dEV}=\frac{1}{1-\mathrm{tg}\theta_1} \tag{6-65}$$

$$\gamma_{p2}=1 \tag{6-66}$$

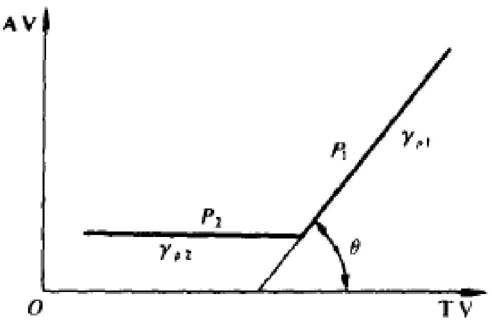


图 6-47 电子程序快门的程序曲线

我们先讨论基本电子快门电路所控制的程序快门工作在 P_1 段时的情况。据有关资料分析，在 P_1 段电子程序快门的光圈数与快门 $t_{开}$ 的关系(见图 6-47)可以用下面的函数逼近

$$\frac{1}{F^2}=Kt_{开}^{\alpha} \tag{6-67}$$

式中 K、α 为与快门结构有关的常数。可以认为电路所控制的时间 t_e 与 $t_{开}$ 接近，所以将 $t_e\approx t_{开}$ 代入(6-67)式，并取对数，得

$$\mathrm{AV}=-\alpha\log_2 t_e-\log_2 K \tag{6-68}$$

为了分析方便，先设 γ_{p1}为定值，由(6-65)式得

$$\mathrm{TV}=\int\gamma_{p1}\mathrm{dEV}=\gamma_{p1}\mathrm{EV}+C' \tag{6-69}$$

式中 C' 为与程序曲线转折点有关的常数。由(6-68)和(6-69)式解得

$$\mathrm{TV}+\mathrm{AV}=\frac{-\alpha\log_2 t_e-\log_2 K}{1-\gamma_{p1}}+\frac{C'}{1-\gamma_{p1}} \tag{6-70}$$

电子程序快门的感光度参数 S 一般都是从测光系统中引入的，所以光敏电阻的电阻值可以表示成

$$R_{\mathrm{CdS}}=R'_0\cdot 2^{-\gamma(\mathrm{BV}+\mathrm{SV})} \tag{6-71}$$

从(6-71)、(6-44,a)和(6-70)式可以得到

$$\mathrm{TV}+\mathrm{AV}=\frac{\alpha\gamma}{1-\gamma_{p1}}(\mathrm{BV}+\mathrm{SV})-\frac{\alpha\log_2[-R'_0C\ln(1-V_c/V_{cc})]+\log_2K-C'}{1-\gamma_{p1}}$$

当 $V_c=V_{ref}$时，电路所控制的程序快门曝光参数的实际值为

$$\mathrm{TV}_p+\mathrm{AV}_p=\frac{\alpha\gamma}{1-\gamma_{p1}}(\mathrm{BV}+\mathrm{SV})-\frac{\alpha\log_2[-R'_0C\ln(1-V_{ref}/V_{cc})]+\log_2K-C'}{1-\gamma_{p1}} \tag{6-72}$$

而程序快门控制曝光参数的理论值为

$$\mathrm{TV}_t+\mathrm{AV}_t=\mathrm{BV}+\mathrm{SV} \tag{6-73}$$

从(6-72)式看出，只有当光敏电阻的 $\gamma=(1-\gamma_{p1})/\alpha$ 和第二项为零时，(6-72)和(6-73)式的右边完全一致，即电路所控制的曝光量没有误差，否则电路所控制的曝光参数只在一个工作点可能没有曝光误差以外，其余部分都有曝光误差(见图 6-48)。

前面我们已经指出，程序曲线的 P_1 段实际上是条复杂的曲线，所以在同一个程序快门中，

γ_{p1}就不是一个常值以及考虑到在 P_2 段对光敏电阻 γ 值的要求，因此在实际应用中，光敏电阻的 γ 值必定会偏离 $\gamma=(1-\gamma_{p1})/\alpha$。

我们选择适当的工作点 BV_{c1}和 SV_{c1}处，调节 V_{ref}或 R_0' 值，使得这一点电路控制的程序快门没有曝光误差。因此在$(BV_{c1}+SV_{c1})$值处，(6-72)式和(6-73)式右边相等，所以有

$$\alpha\log_2[-R_0'C\ln(1-V_{ref}/V_{CC})]+\log_2 K-C' = (\alpha\gamma+\gamma_{p1}-1)(BV_{c1}+SV_{c1})$$

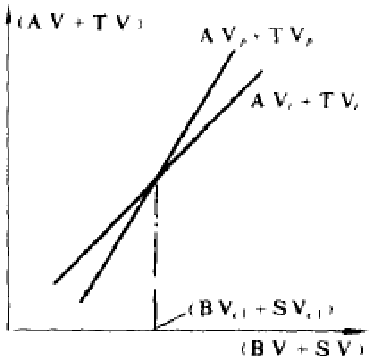


图 6-48 电子程序快门(AV+TV)曲线

将上式代入(6-72)式，得到校正后的电路所控制的程序快门的实际曝光参数

$$TV_p+AV_p=\frac{\alpha\gamma}{1-\gamma_{p1}}(BV+SV)-\left(\frac{\alpha\gamma}{1-\gamma_{p1}}-1\right)(BV_{c1}+SV_{c1})$$

将上式减去(6-73)式，得电路所控制程序快门所产生的曝光误差

$$\Delta EV=(TV_p+AV_p)-(AV_t+AV_t) =\left(\frac{\alpha\gamma}{1-\gamma_{p1}}-1\right)[(BV+SV)-(BV_{c1}+SV_{c1})] \tag{6-74}$$

从(6-74)式看出，当测光系统中光敏电阻的 γ 值为$(1-\gamma_p)/\alpha$ 时，在程序曲线 P_1 段整个范围内没有曝光误差，否则只在$(BV_{c1}+SV_{c1})$值处才没有曝光误差，且离$(BV_{c1}+SV_{c1})$值处越远，所产生的曝光误差越大。

下面我们讨论基本电子快门电路控制的电子程序快门工作在程序曲线 P_2 段时的情况。由于程序快门工作在程序曲线 P_2 段时，程序快门的光圈的通光面积已经开得最大，而且不随快门的曝光时间变化而改变。所以我们可以用类似分析光圈优先电子快门的方法得出，电子程序快门工作在 P_2 段时所要求的光敏电阻的 γ 值为 1 和在$(BV_{c2}+SV_{c2})$值处校正后，当 γ 值偏离 1 时，所产生的曝光误差为

$$\Delta EV=(\gamma-1)[(BV+SV)-(BV_{c2}+SV_{c2})] \tag{6-75}$$

从上面的讨论和分析可以看出，一个电子程序快门工作在不同的程序曲线段，所要求的光敏电阻的 γ 值是不同的，尤其是在程序曲线转折点两边要求有突变，这在同一个光敏电阻上是不可能实现的。在实际应用中只能选用一个适当的 γ 值和正确选择校正点，使得在快门的最常用的曝光范围内，得到最小的曝光误差。

三、对数压缩电子快门电路

基本电子快门电路只适用于曝光范围较窄的低档普及型照相机，而对于大多数中高档照相机，由于它们的测光范围大，这种电路就不能适应了，例如，对于一个测光范围为 EV＝1～18 的照相机，即它测量的景物平均亮度变化为 13 万倍。假设景物平均亮度最小时，测光电路就要输出 1mV，那么景物平均亮度最大时，测光电路就要输出 130V 电压。当然用几伏电池的照相机电路要产生这么高的稳定电压是不方便的，而且后续电路也不可能承受这么高的电压和处理这样大范围的值。解决的办法就是对照相机的输入信号进行对数压缩处理，把变化 13 万倍的信号变为变化 18 倍的信号，用一般的电路就可以处理了。

我们讨论过用二极管进行对数压缩的(6-49)式为

$$V_D=nV_T\ln(I_D/I_s)$$

即二极管两端的正向电压与流过二极管的正向电流成对数关系。

当要把曝光参数进行对数压缩时，先要把这些参数转换成电流，然后让这些电流流过二极管，那么二极管两端的电压就与这些参数成对数关系，用光敏电阻作为测光元件时，由于它的输出电流比较大，所以可以直接用二极管与它串联对被摄景物平均亮度进行对数压缩处理[图 6-49(a)]。当采用响应速度快、线性好的硅光电二极管作为测光元件时，由于它的输出电流小，加上只有在短路状态下使用，输出电流的线性才好的特点，一般都用由高输入阻抗的运算放大器组成的对数放大器进行对数压缩处理[图 6-49，(b)]。

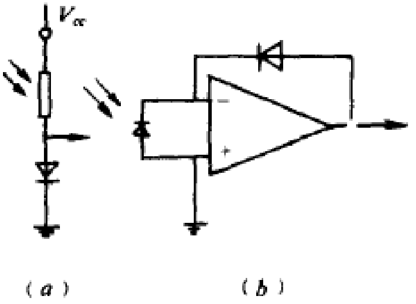


图 6-49 对数压缩测光电路

曝光量控制系统都是遵循曝光参数方程式的，把曝光参数方程式进行不同形式的对数变换，就要用不同的电路来实现变换后的方程式。例如我们把曝光参数方程式变换成下列形式

$$\ln L - \ln \frac{F^2}{S} = \ln K - \ln t \tag{6-76}$$

那么就可以用图 6-50 所示的电路原理图来实现这样的方程式。

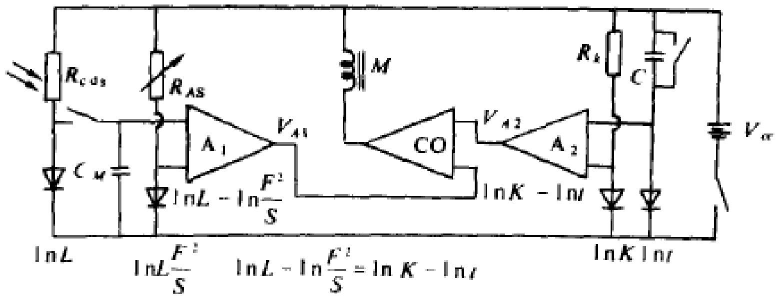


图 6-50 对数压缩控制电路原理图

在电路中光敏电阻 R_{Cds} 函数电位计 R_{A}、电容器 C 和 R_K 分别把曝光参数 L、F、S、t 以及曝光常数转换为电流，然后由二极管再把这些代表曝光参数和曝光常数的电流进行对数变换，再由二个差分放大器 A_1 和 A_2 分别进行减法运算。由于记忆电容器 C_M 在测光时记忆了代表被摄景物平均亮度 L 的电压量，所以左边的差分放大器 A_1 的输出电压 V_{A1} 在曝光开始后是恒定的，而右边代表曝光时间 t 的电压量是随着曝光时间 t 增长而改变的，因此右边的差分放大器 A_2 的输出电压 V_{A2} 也随曝光时间 t 的增长而改变。当曝光时间 t 达到预定值时，$V_{A1}=V_{A2}$，电压比较器 CO 就使电磁铁 M 断电，快门关闭，曝光结束，所以图 6-50 的电路就实现(6-76)式的方程式。

6-5.3　数字电路和微机自动控制曝光量的基本原理

一、数字电路自动控制曝光量的原理

随着大规模集成技术的发展，广泛用在自动控制和仪器仪表中的数字电路也被采用到中高档的照相机的自动控制曝光量中来了。

在曝光量控制电路中，数字电路之所以能逐步替代模拟电路，是因为数字电路有以下特点：

(1)数字量的运算处理不易受电源电压和环境温度的影响；

(2)用 LED 以数字形式来显示曝光参数，既直观又清晰；

(3)可能用精度和稳定性都很高的石英晶体振荡器作为曝光时间控制的时钟电路；

(4)可以控制比较长的曝光时间；

(5)用数字存储器可以长时期地记忆曝光参数。

数字电路在曝光量控制电路中的应用范围是随着数字集成电路技术的提高而逐步扩大的。最早的数字电路只是用来作为曝光量控制电路中曝光参数的显示单元。后来逐步扩大到曝光参数的记忆和控制单元。现在的数字电路控制的曝光量电路中，除测光电路单元以外，已全部数字化了。

图 6-51 是一种数字控制电路的框图，由于采用了数字运算器，所以引入的曝光参数必须经数字化处理。测光电路输出的模拟量要经过 A/D 变换器变换成数字量，预置底片的感光度和光圈数可以采用数字式编码器。

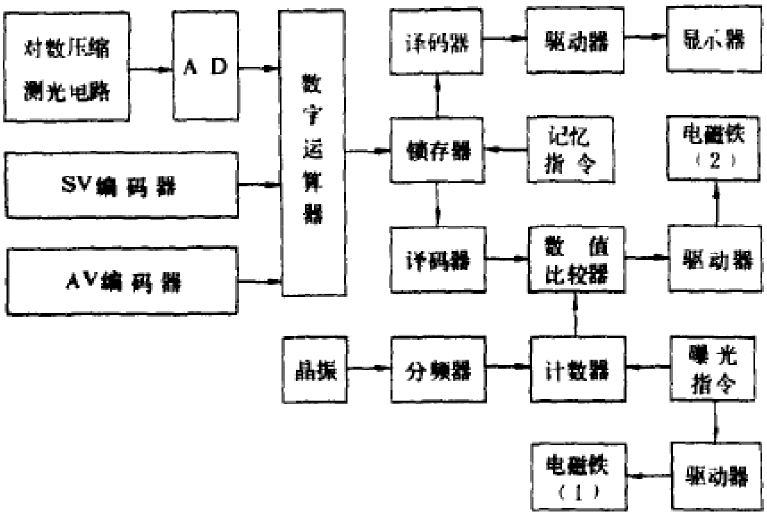


图 6-51　数字控制电路框图

图 6-52 是一个简化了的数字电路控制的光圈优先电子快门电路原理图。图中的 SPD、二极管和运放 A 组成对数压缩测光电路，它的输入量为景物平均亮度 L，输出量是模拟 BV 的电压量 V_B。虚框是一个三位计数型 A/D 变换器。这种 A/D 变换器虽然转换速度低，但是由于它的结构简单，所以对于转换速度要求不高的曝光量控制还是比较合适的。这种 A/D 变换器中，三位权电阻网络和三位二进制计数器组成 D/A 变换器。权电阻网络中每一个电阻的阻值与对应位的权成反比。D/A 变换器的输出 V_{DA} 与二进制计数器的输出有以下关系

$$V_{DA}=\frac{V_R}{2^3-1}(d_2\times 2^2+d_1\times 2^1+d_0\times 2^0)$$

式中 d_2、d_1、d_0 为计数器各位的状态(1 或 0)；V_R 为计数器各位状态为 1 时的电压值。

下面分析这个 A/D 变换器是怎样工作的。开始时，计数器处于复位状态，各位输出都是“0”，所以 $V_{DA}=0$。当要测光时，合上 K_1，单稳态触发器 1 就输出一个脉冲，使 RS 触发器置位，Q 端为高电平，打开了门 G_1，晶体振荡器产生的时钟脉通过门 G_1 到达计数器。随着计数器的计数值的增加，V_{DA} 也增大。当 $V_{DA}\geqslant V_B$ 时，比较器 C 的输出由高电平转为低电平，使得三极管输出由低电平转为高电平，RS 触发器就复位，关闭门 G_1，计数器停止计数。计数器的输出就是 A/D 变换器将 BV 的模拟量 V_B 转换为数字量的结果。

A/D 变换器输出的数字量通过加法器与 SV 编码器预置的 SV 值的数字量相加，然后，再

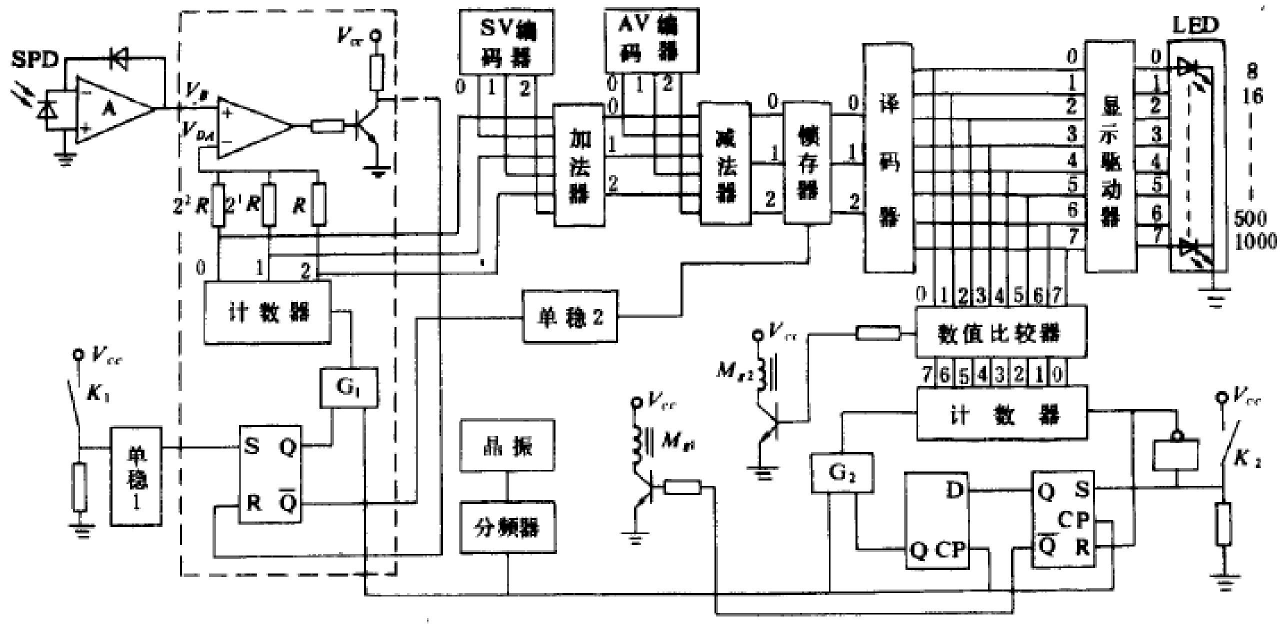


图 6-52 简易数字控制电路

通过减法器与 AV 编码器预置的 AV 值的数字量相减得到一个数字量的结果。这个数字量由单稳态触发器 2 控制的锁存器锁存。单稳态触发器在这里的作用是保证锁存器锁存的值是经加法器和减法器运算结果的稳定值。

由于这里采用的三位 A/D 变换器、加法器和减法器，所以得到的值只能是相当于十进制的 0～7 八个值，显然这不一定就是曝光量控制系统的 TV 值的实际范围。所以锁存器的输出出值只代表八种 TV 值，而不就是 TV 的实际值。

锁存器的输出经三位二进制译码器将三位二进制的代码译成 $D_0 \sim D_7$ 八个输出端中一个对应号码端为高电平，其余七个端均为低电平。译码器的输出一路经显示驱动器使指示相应曝光时间的 LED 发光，另一路供给曝光时间控制电路。

曝光时间控制电路应根据译码器的输出状态转换成相应的曝光时间。假设这个曝光量控制电路所控制的是 TV＝3～10 八个曝光时间值。它们与译码器 $D_0 \sim D_7$ 八个输出端中的高电平端正好顺序对应。TV＝3～10 相应的曝光时间为 1/8s～1/1024s，也可以表示成 $2^7 \times (1/1024)\text{s} \sim 2^0(1/1024)\text{s}$。曝光时间控制电路中的计数器是一个八位二进制计数器，所以它的八个输出端 $D'_0 \sim D'_7$ 中每一个为高电平时的计数值分别为 $2^0 \sim 2^7$。如果晶体振荡器的输出经分频后的时钟脉冲的频率为 1024Hz，那么计数器以这个时钟脉冲计数时，$D'_0 \sim D'_7$ 输出端每一位为高电平时所需时间分别为 $2^0(1/1024)\text{s} \sim 2^7(1/1024)\text{s}$。因此，八位二进制计数器的八个输出端的高电平端所相应的曝光时间与电路中的三位二进制译码器八个输出端的高电平端所相应的曝光时间正好逆序对应。

曝光时间控制电路中的关键电路是一个八位数值比较器。它有二个八位输入端。平时它的输出端为高电平，只有在二个八位输入端相对应位的状态完全相同时，它的输出端才变成低电平。由上面分析得知，本电路中三位二进制译码器的八个输出端和八位二进制计数器的八个输出端的高电平位与曝光时间的关系，前一个是顺序对应，后一个是逆序对应。所以它们中的一个与数值比较器的输入端顺序相连，而另一个是逆序相连。

曝光控制开关 K_2 平时是断开的，它的输出为低电平，这时计数器和 RS 触发器复位，所以 D 触发器输出为低电平，封住了门 G_2，计数器不能计数。当要曝光时，合上 K_2，它的输出高电平使计数器处于计数状态和 RS 触发器处于置位状态。RS 触发器输出端 $\overline{Q}$ 的低电平使控制电

磁铁 Mg_1 的三极管截止，释放快门前帘，同时它的 Q 端高电平使 D 触发器在时钟脉冲的作用下输出端也为高电平，门 G_2 被打开，时钟脉冲就可以通过门 G_2 到达计数器。当计数器计数到它的输出端 $D'_7 \sim D'_0$ 与译码器输出端 $D_0 \sim D_7$ 的各位都相同时，数值比较器的输出由高电平变为低电平，使得控制电磁铁 Mg_2 的三极管截止，释放了快门的后帘。这就达到了曝光时间的数字控制。

以上只是为了分析方便，采用了一个简化了的电路作为例子，由于它的位数只有三位，所以能控制的曝光范围很窄和控制精度很低。实际电路应根据所控制曝光范围和控制精度来选取电路的位数。

二、微机曝光量控制系统

自 70 年代初第一代微处理器诞生以来，由于它的成本低、体积小使得计算机技术能渗透和占领各个技术领域。中高档照相机的控制电路在数字化的基础上也朝着微机化的方向发展。

微机的功能是由其硬件和软件共同确定的。所以不同功能的照相机可以采用相同的硬件配用不同的软件来实现控制。由于软件开发周期短、成本低，这就有利于缩短新照相机的开发周期和降低成本。另一方面，一个微机的硬件可以配备几套功能不同的软件，这就解决了照相机的多功能的控制问题。所以采用微机控制正好解决了照相机发展中要求的功能多，成本低和更新快的特点。

常见照相机的曝光量控制方式大致可以分为：(1)光圈优先，自动控制快门方式；(2)快门速度优先，自动控制光圈方式；(3)程序控制方式；(4)自动闪光灯调光方式；(5)手动控制方式。一般照相机只能具有其中一种或两种曝光控制方式，采用微机控制的照相机比较容易实现多种曝光量控制方式。

图 6-53 是一个能实现光圈优先、快门速度优先和程序控制三种控制曝光量方式的微机控制系统结构图。CPU 和 ROM、RAM、输入接口、输出接口组成微机系统。其中输入接口是三态缓冲器，输出接口是锁存器。

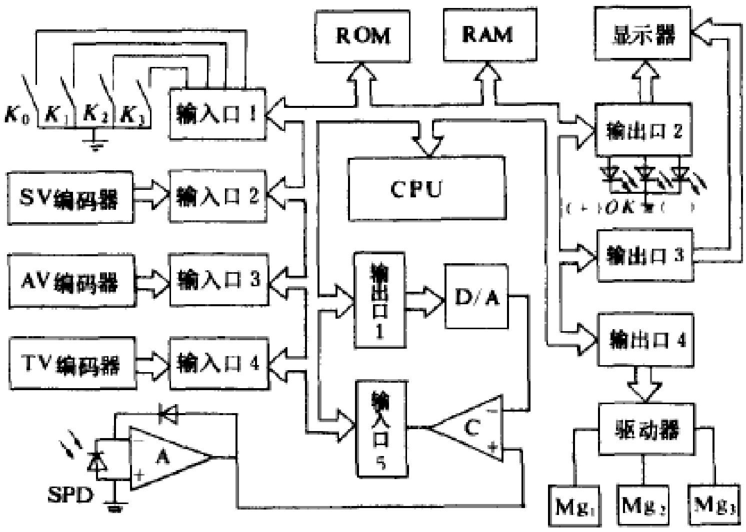


图 6-53 微机控制系统结构图

CPU 通过输入接口 1 输入曝光命令和所选择的曝光方式。其中 K_0 为曝光命令开关，K_1、K_2 和 K_3 分别为光圈优先、快门速度优先和程序控制三种曝光量控制方式的选择开关。只要合上某个开关，CPU 就可以接到曝光命令或所选择的曝光量控制方式。输入接口 2、3 和 4 与

SV、AV 和 TV 三个格雷码编码器相连，输入预置的曝光参数。

SPD 和运放 A 等组成对数压缩测光电路。输出接口 1、比较器 C、D/A 变换器和输入接口 5 组成一个以软件实现的逐次逼近式 A/D 变换电路。A/D 变换器将测光电路输出的模拟电压转换成二进制数码。

输出接口 2、3 和 LED 七段数码管组成扫描显示系统，用来显示所控制的快门速度和光圈数。输出接口 2 还连接三个 LED，分别显示曝光过度（＋）、曝光不足（－）和曝光合适（OK）。

输出接口 4 连接驱动器控制快门前帘和后帘电磁铁 Mg_1 和 Mg_2 以及锁定自动光圈的电磁铁 Mg_3。

自动光圈一般有两种控制方法。一种方法是光圈在收缩过程中，与光圈联动的绝对值或增量编码器将光圈的瞬时值 AV_t 不断地传递给 CPU。当其值与要控制的光圈值 AV 相等时，就由电磁铁锁定光圈。另一种方法的原理是单镜头反光照相机的测光元件上所接受到的光能量不但与景物平均亮度有关，而且与测光时光圈大小有关。因此，可以根据全开光圈 AV_m 时测得的 BV_m 和收缩光圈过程中测得的 BV_t 值来求出光圈的瞬时值 AV_t。同样，当 AV_t 等于要求的 AV 值时，由电磁铁锁定光圈。这种方法可以省一个与光圈联动的编码器机构。本电路中采用的是第二种方法。

图 6-54 是图 6-53 微机控制系统的程序流程图。只要在图 6-53 微机控制系统的硬件中增加少量开关和再加一些软件就很容易实现手动控制曝光量方式和自拍等功能。

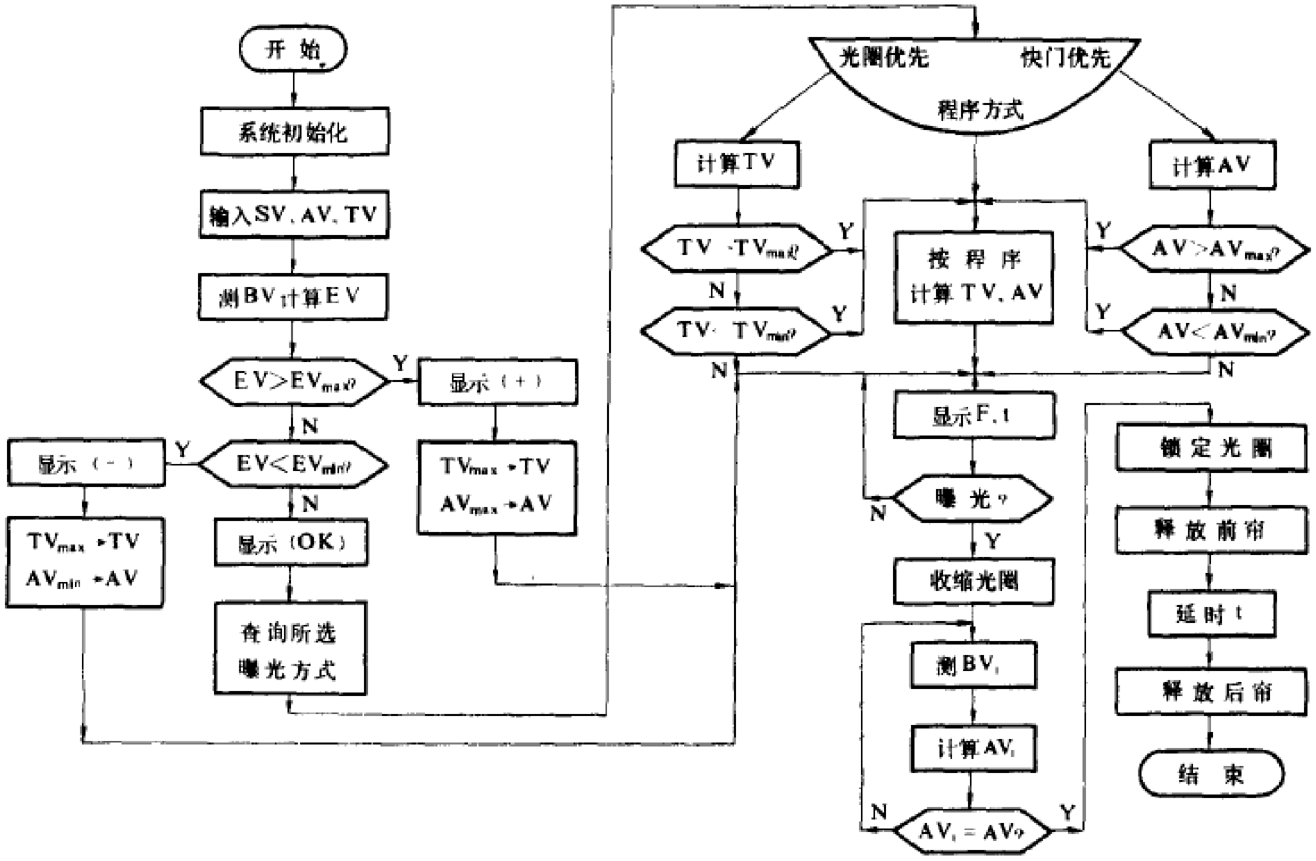


图 6-54　微机控制系统程序流程图

§ 6-6　光电法测定像面曝光量

半自动或自动控制曝光量的照相机是按照曝光参数方程式来控制像面曝光量的，仅仅测量快门速度和光圈值而不考虑其他影响曝光量的因素是没有意义的。要正确地检验和评价半

自动或自动控制曝光量照相机控制曝光量的准确程度，应当直接测定像面的曝光量。测定的方法主要有三种：光电测定法、照相测定法和实物照相法。

光电测定法是直接测定像面曝光量。照相测定法是利用感光材料的摄影密度转换成像面曝光量。实物照相法是具体拍摄各种典型实景，根据冲洗出来的照片判断感光材料所受的曝光量是否正确。

这些方法中，光电测定法由于测定迅速、重复性好，被广泛采用。本节主要讨论光电测定法。

光电法测定像面曝光量的测定装置由亮度均匀的面光源和像面曝光量测定仪组成。

面光源是用来模拟亮度均匀的景物的。面光源是用一个色温为 4700±200K 的 B 光源从背面照射一块对波长无选择性的均匀扩散板形成。面光源的大小应能同时覆盖照相机镜头和测光系统的视场。整个光源的亮度不均匀性应在±4%之内，与光轴成 60°角时的光源亮度至少应该是同一点光轴上亮度的 85%。

像面曝光量测定仪的基本原理如图 6-55 所示。它是由一个光电转换元件（通常为光电管、光电倍增管或半导体光敏二极管等）和作为光电接收装置入口的积分球或圆形乳白玻璃组成的光接收装置 A。通常把光电转换元件与一个积分电路相联，在最简单的情况下，这个积分电路就是一个电容器 C。一个高输入阻抗的电压表指示所测得的曝光量值。图 6-55 中的 E_1 是光电转换元件的电源。电阻 R_1 和 R_2 以及电源 E_2 是用来补偿光电转换元件暗电流的。电阻 R 是曝光量测定仪的标定电阻（只是在标定时才接上）。SW 是曝光量测定仪的复位开关。

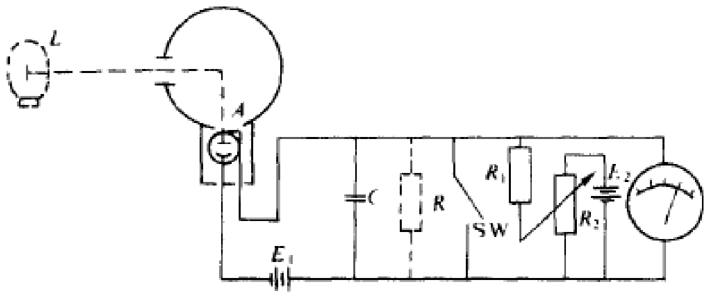


图 6-55 曝光量测定仪的原理图

光接收装置的入射口的面积大小应符合被测照相机设计时所采用的 K 值〔参看曝光参数方程式(6-10)式〕所对应的典型条件。我国有关国家标准① 规定曝光量测量应当在摄影物镜焦平面上与光轴同轴的，直径为照相机名义画幅短边长度 3/4 的圆面积内进行，例如，对于 135 照相机，光接收装置入射口的直径即为 18mm。

测量时，把被测照相机对准面光源，并把照相机调焦到 5m 或更远处，然后把光接收装置的入射口精确地放在焦平面的中间位置。当照相机曝光时，光电转换元件产生的光电流就向电容器 C 充电。只要电容器 C 的参数选得合适，那么曝光结束时，电容器 C 两端的电压与光电转换元件输出的电流和曝光时间的积分成比例，也即与像面曝光量成比例。因此连接在电容器 C 两端经过专门标定过的高输入阻抗电压表就可以直接指示出所测曝光量或其误差(ΔEV)

曝光量测定仪可以用以下的方法来标定：

在曝光量测定仪的光接收装置入射口的正前方放置一个已知光强度为 I，色温为 2856K 的灯泡 L。根据光度学公式可以计算出灯泡 L 在光接收装置入射口所产生的光照度 E（也可采

① 中华人民共和国国家标准，GB9187—88，照相机曝光自动控制。

用其它办法得到已知光照度 E)。当曝光量测定仪的电路中接入已知阻值的标定电阻 R 后，高阻抗电压表所指示的曝光量为

$$H = ERC$$

式中 E 为光接收装置入射口的光照度(lx)；C 为积分电容器的电容量(F)；R 为标定用电阻的阻值(Ω)；H 为高输入阻抗电压表应指示的曝光量值(lx·s)。

§6-7 航空摄影机中曝光量的自动控制

航空摄影与普通摄影一样，对于一定感光度的胶卷需要一定的合适曝光量。由于航空摄影一次出航摄影的地区非常大，地面景物平均亮度变化也就比较大，所以事前在机场装定好的曝光参数很难满足一次出航全部摄影的需要。加上有些侦察飞机的摄影员是由飞行员兼的，他在整个飞行过程中，不可能根据地面景物平均亮度的变化随时重新装定曝光参数。因此，从某种意义上来讲，航空摄影机更迫切需要有曝光量的自动控制系统。

由于航空摄影机的快门和光阑机构都比较大，所以一般都采用小功率的直流电机、交流电机或步进电机对它们进行调节。

图 6-56 是一个快门速度优先，自动控制光圈的航空摄影机曝光量自动控制系统的原理框图。图中高阻抗运算放大器 A_1 和蓝硅光电池 BSC 组成对数压缩测光系统，它的输出 V_L 与被测地面景物平均亮度 L 的对数值成正比。函数电位器 $R_{S/C}$的输出电压 $V_{S/C}$与装定的所选用的航空胶卷感光度 S 和滤光镜系数 C 的比值的对数值成正比。函数电位器 R_t 的输出电压 V_t 正比于所装定的快门曝光时间 t 的对数值。由于运算放大器 A_2 的输入信号都是各个曝光参数的对数值，所以可以用加减运算来解曝光方程式。经过 A_2 运算后的输出 V_F 正比于所需控制光圈的 F 数平方的对数值。

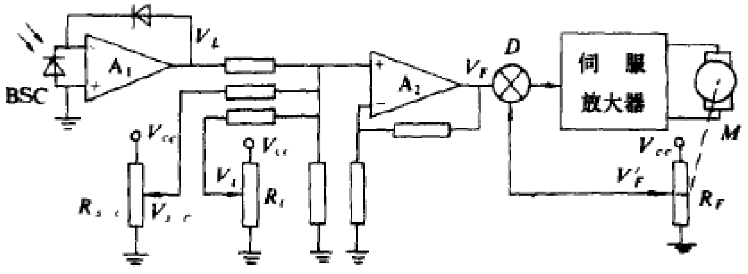


图 6-56 光圈自动控制系统框图

控制光阑机构的是一个直流永磁电机 M，它与伺服放大器等组成一个伺服系统。函数电位器 R_F 的活动触点是与光阑机构联动的，它的输出电压 V'_F 正比于当前光圈的 F 数平方的对数值。

测光系统与摄影机的视场是对着同一个地面景物的。当摄影时，若运放 A_2 的输出 $V_F > V'_F$，说明这时摄影机的当前光圈的 F 数小于要求的 F 数。V_F 和 V'_F 经差动电路后，输出一个误差电压 $\Delta V>0$。ΔV 经伺服放大器放大后，控制光阑机构朝着增加光圈的 F 数方向转动。与光圈联动的电位器 R_F 的输出 V'_F 随着 F 数的增加而增加。当 $V_F = V'_F$ 时，$\Delta V=0$，直流电动机就停止转动，光阑就被控制到能使底片获得合适曝光量的位置。

如果摄影过程中，地面景物的平均亮度 L 减小了，运放 A_2 的输出 V_F 也就跟着减小。这时，$V_F < V'_F$ 和 $\Delta V<0$，伺服放大器就控制直流电动 M 带动光阑机构朝着减小光圈的 F 数方向转动，函数电位器 R_F 的输出 V'_F 跟着减小，直到 $V_F = V'_F$ 时，光阑又被控制到能使底片获得合

适曝光量的位置。

现在大多数航空摄影机都用微机进行控制。当然，航空摄影机的曝光量也可以由微机控制。图 6-57 是一个单片微机曝光量控制系统方案的结构图。

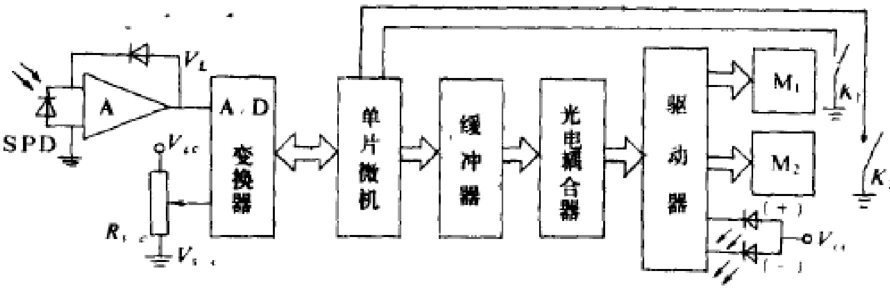


图 6-57 微机曝光量控制系统结构图

这个控制系统采用程序控制曝光量方式，即快门速度和光圈的大小都可以进行调节。但是，它们不是同时进行调节的，在地面景物的平均亮度 L 较大时，快门处在最短曝光时间的位置，这时通过调节光阑来控制曝光量。假若地面景物的平均亮度 L 逐渐减小，光阑孔径就逐渐加大，当光阑孔径增大到最大孔径时，控制系统就停止控制光阑，改由调节快门的曝光时间来满足曝光量的要求。如果地面景物平均亮度 L 由小逐渐变大，它的控制顺序与上述相反。由于这个系统中的快门曝光时间和光阑孔径都可以自动调节，所以适应地面景物平均亮度 L 变化的范围比较大。

这个微机控制系统的核心是一片带片内 EPROM 和 RAM 的单片微机。整个控制程序和固定的数据存放在片内 EPROM 中，而运算中的中间结果和变量暂存在片内 RAM 中。

对数压缩测光电路的输出电压 V_L 正比于被测的地面景物的平均亮度 L 的对数值。函数电位器 $R_{S/C}$ 的输出电压 $V_{S/C}$ 正比于所装定的胶卷感光度 S 和滤光镜系数 C 的比值 S/C 的对数值。电压 V_L 和 $V_{S/C}$ 经 A/D 变换器数字化后供微机运算和处理。

快门和光阑分别由三相小功率步进电机 M_1 和 M_2 控制。步进电机 M_1 和 M_2 采用三相六拍运行方式。开关 K_1 和 K_2 分别为快门处在最短曝光时间(t_{min})和光圈处在最小孔径(F_{max} 位置的信号开关。当 CPU 查询到 K_1 和 K_2 接通(输出“0”)时，表示快门已处在最短曝光时间和光圈已处在最小通光孔径位置。这个位置分别作为控制快门和光阑的起始零位。LED(＋)和 LED(－)是曝光过度和曝光不足指示灯。它们发光时，说明地面景物的平均亮度已超出该摄影机能使所用胶卷获得合适曝光量的控制

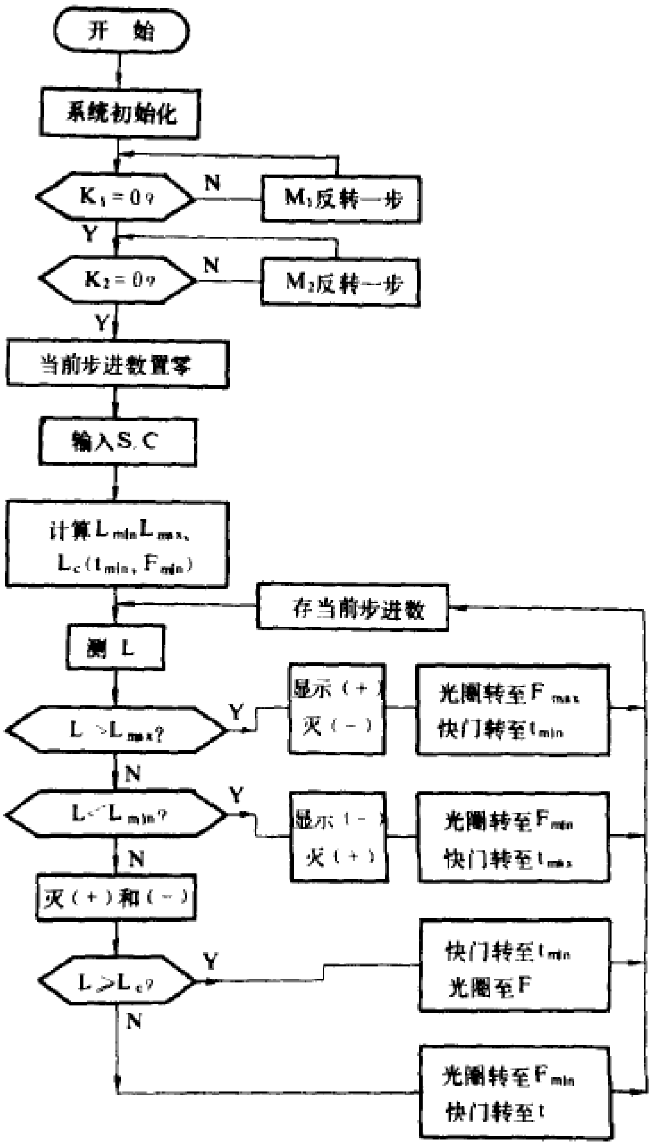


图 6-58 微机曝光量控制系统程序流程图

范围。

在控制系统接通电源后，首先使系统初始化和检查快门和光圈是否处在零位，否则就逐步控制步进电机 M_1 和 M_2 使快门和光圈逐步回到零位，并在当前步进数 RAM 区中置零。输入 S/C 值，并根据有关曝光参数计算这个控制系统所对应的地面景物平均亮度 L_{max}（对应 t_{min}和 F_{max}）、L_c（对应 t_{min}和 F_{min}）和 L_{max}（对应 t_{max}和 F_{min}）。随后，把这三个数存放在相应的 RAM 区。

接着，不断地检测地面景物平均亮度 L。根据测得 L 值的不同大小，采用不同的控制方法。当$>L_{max}$时，点亮 LED(＋)和息灭 LED(－)，将快门调节到 t_{min}和光圈调节到 F_{max}，并且在当前步进数 RAM 区存放相应 t_{min}和 F_{max}的步进数。当 $L<L_{min}$时，就点亮 LED(－)和息灭 LED(＋)，将快门调节到 t_{max}和光圈调节到 F_{min}，并在当前步步数 RAM 区存放相应 t_{max}和 F_{min}的步进数。当 $L_{min}\leqslant L\leqslant L_{max}$时，就息灭 LED(＋)和 LED(－)，再根据 $L\geqslant L_C$ 或 $L<L_C$ 的情况，将快门调节到 t_{min}和光圈调节到需要的 F，或将光圈调节到 F_{min}和快门调节到需要的 t，并在当前步进数 RAM 区存放对应的 t 和 F 的步进数。因此，只要地面景物的平均亮度 L 在 L_{min}和 L_{max}之间就能使所用底片获得合适的曝光量。

这个系统的程序流程如图 6-58 所示。

第七章　取景观察系统

取景，就是摄影时选取景物的拍摄范围。

最简单最直接的办法，是像照相馆里所用的座机那样，在相机安放感光材料的画幅框上先放上一块毛玻璃，取好景后，再换上感光材料进行摄影。但这种取景方法所看到的景像是倒的，使用也比较麻烦。所以，目前摄影机中广泛使用的是能得到同样取景效果但更方便的间接装置，叫做取景器。

显然，对取景器的基本要求就是：应保证通过取景器所看到的景物范围和实际记录在感光材料上景物范围一致。在实际照相机中，为了保证不丢失取景时所看到的景物，一般取景器中所看到的范围比拍摄在底片上的要稍小一些。例如，允许小到实际像幅面积的 80%，有的相机甚至允许边长小到像幅边长的 80%。

既然摄影者是通过取景器来看到所拍摄的景物的，于是，除了最简单的直视方框式的取景器以外，大多数取景器的观察系统也同时可以兼作测距对焦时的观察系统。各类一般摄影用的自动控曝和半自动控曝照相机中，还将一些摄影参数（例如快门速度、光圈大小）以及警告信号指示（例如曝光过度、曝光不足、电池耗竭失效等），显示在观察系统的视场边上。航空摄影系统中的取景器一般和操纵器结合在一起，照相员通过取景器观察地面景物，同时操纵适当的荐构，引入偏流角和完成协调动作等。

老式的照相机中采用简单的直视方框式取景器（图 7-1），它没有任何光学零件，而是由两个相隔一定距离的大小金属框所组成的。取景时人眼距小框的距离一般设计在 10mm 左右。

这种取景器的缺点很多，现只在一些简易的及特殊用途（例如水下摄影）的照相机上尚可见。

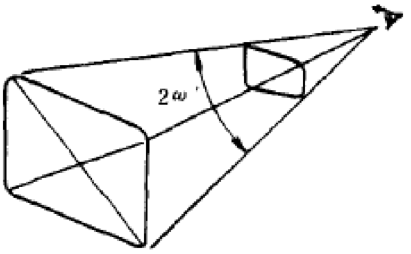


图 7-1　框式取景器

目前广泛应用的取景器主要有这样的两类：

（1）虚像式取景器，也叫直视式光学取景器（direct-vision optical viewfinder），主要用在平视式照相机中。

（2）实像式取景器，也叫毛玻璃屏取景器（ground-glass screen viewfinder），主要用在单反式照相机中。

§7-1　虚像式取景器

最简单的虚像式取景器是单块负透镜的取景系统，如图 7-2 所示。远处被摄物体 y，通过负透镜在其像方焦点 F' 附近成一直立虚像 y'，供人眼观察。由图可见，这种取景器的视场是不确定的，它的大小与眼瞳位置以及眼瞳大小有关，并且由于取景器框（一般就是负透镜框，它是取景系统的视场光阑，同时也就是入射窗）不可能与被摄物体重合，因此看到的视场边上还会出现渐晕现象。

当眼瞳位置及大小如图 7-2 中所示时，无渐晕的视场为 $2\omega'$，但因眼瞳有一定直径，因此看到的视场，还有有渐晕的部分[图 7-2,(*b*)]。当眼瞳向右移离 O 点时，视场角为 ω' 的光束显然不能充满眼瞳，即无渐晕的视场缩小；而当眼瞳向左移近透镜时，则情形刚好相反。改变眼瞳的

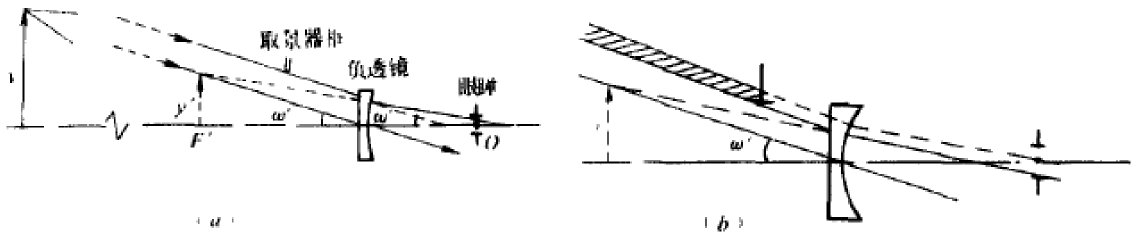


图 7-2　单块负透镜的取景系统

大小也有类似效果。另外，眼瞳在与光轴垂直方向上的偏移则会对取景范围产生不对称的错误。

在现代小相机中，更多的是采用由伽里略望远系统组成的光学取景器，这种取景器有时叫做牛顿式取景器(Newton finder)①，即，再用一个正透镜的目镜将负透镜所成缩小了的景物虚像放大后供人眼观察，如图 7-3 所示。伽里略望远系统的取景器一般放大倍率在 0.6～1 之间，对于一些不可更换镜头的较为简单的相机，常取 1 倍放大，以便于取景时两眼可同时睁开着，给人以一种画幅重叠在实景上的印象。

对于望远系统，我们在应用光学等有关课程里已经学过，它的观察视场同样与眼瞳的大小和位置有关，因之也是不确定的，并会出现渐晕现象。

在照相过程中，为要正确取景而要求将人眼在取景时严格限制在一个特定的位置上(而且还要求严格大小的眼瞳!)，这显然是十分可笑的。为此，必须在照相机的取景器中设法给出一个可以不随人眼位置大小变化而变化的取景范围，这就是在小相机的逆伽里略望远系统中引入的亮框指示。

指示取景范围的亮框一般可用两类方式引入取景视场。一类为透射式[图 7-4(*a*)]，另一类为反射式[图 7-4(*b*)]。反射式亮框的直视式光学取景器也叫阿尔巴达取景器(Albada② finder)，它的结构形式可以是如图 7-5 中的多种方案。图 7-5，(*a*)[也就是图 7-4，(*b*)]是最简单的形式，四周镀金反射膜的凹面镜将反射型亮框反射的光线反射入人眼，它起到放大亮框的作用，并使亮框的像与景物的像重合。图 7-5，(*b*)是将全反射层镀在取景物镜第二片凹透镜第二面的四周。这种结构中的亮框很明亮，但当眼瞳位置稍有偏离时，亮框的一部分会从视场中消失。图 7-5，(*c*)则是将取景物镜第二片凹透镜的第二面镀以半透半反膜。它没有亮框随眼瞳摆动时的消失现象，但整个视场和亮框均较暗并将带色。

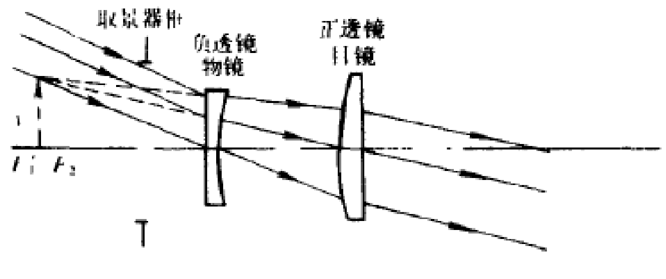


图 7-3　牛顿式(逆伽里略望远系统)取景器

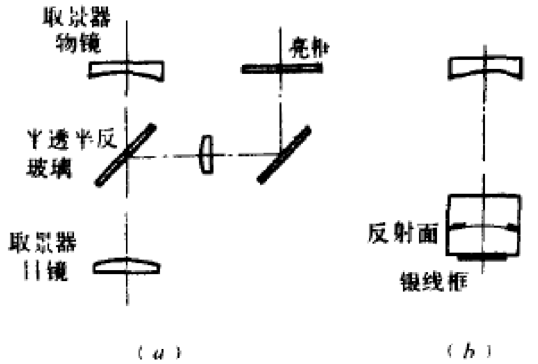


图 7-4　取景框的引入

① 见参考文献[6]，牛顿式取景器就是逆伽里略望远系统的取景器，有的书上(例如[24,27])把单个负透镜的型式叫牛顿式是误解。

② E. L. W. van Albada，1932

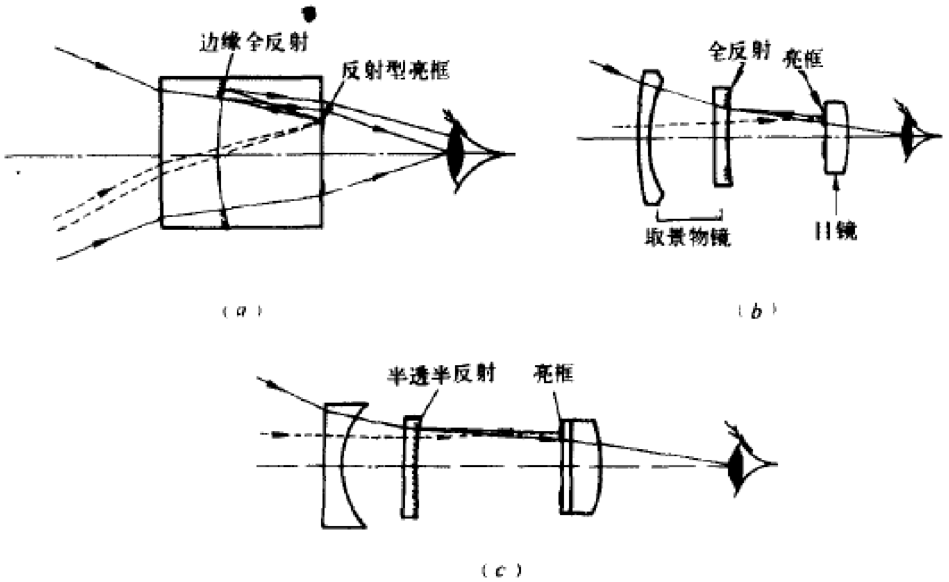


图 7-5　几种 Albada 取景器形式

§7-2　实像式取景器

实像式取景系统的基本原理如图 7-6 中所示。图中(*a*)是单镜头反光相机中的取景方式，它的典型系统如图 7-7(*a*)所示。图 7-6(*b*)则是一般 120 双镜头反光相机的典型取景调焦系统。上方的放大镜是供调焦时观察影像清晰程度用的，一般只能看到视场中央一小部分。

图 7-7(*a*)中场镜的作用是为了改善像的亮度。但当视场较大时，只用一块场镜，它的光焦度势必要求很大，所以在场镜上再加上一块环带透镜。环带透镜也叫菲涅尔场镜，它的作用相当于一块大光焦度的场镜。它是把场镜分成一系列同心环带，每一环带是场镜凸面的一部分，压缩各环带的厚度，构成带边像锯齿的薄板[图 7-7，(*b*)]。环带透镜一般用塑料热压而成，每一环带的宽度应不影响像的清晰度，一般取 0.04～0.12mm，环带面紧贴场镜以免积尘。

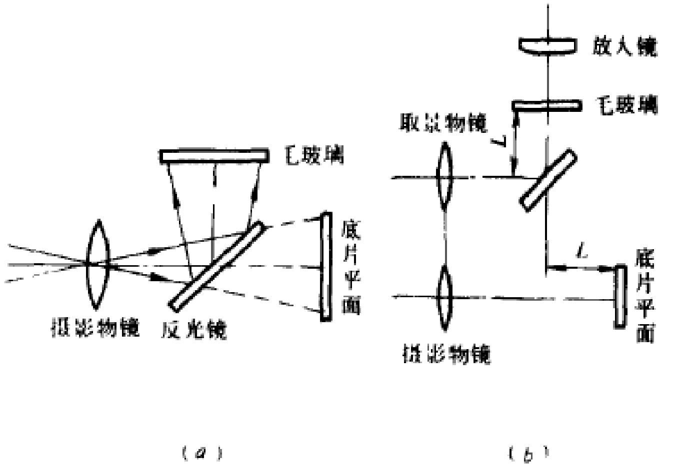


图 7-6　实像式取景原理

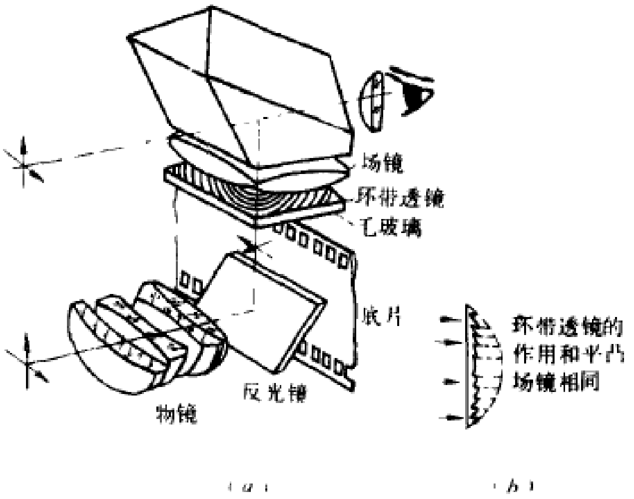


图 7-7　单反相机中的典型实像式取景系统

单镜头反光相机的取景系统和摄影系统共用一个入口物镜，光路重合，因此就不存在下面要讨论的取景视差问题。它的缺点是在胶片曝光瞬时，反光镜需上翻，让开曝光光路，同时切断取景光路，视场变黑，使摄影者有不舒服的感觉，并且取景和拍摄之间有一定的时间差(有的书上叫做“时间视差”)，反光镜上翻时的冲击力，还易使相机发生抖动，对显微摄影时是不利的。

图 7-8 中是几种单反相机中实像式取景器的变型。图(*a*)中用普柔直角反光镜取代五角棱

镜，因此重量轻，但光路增长，体积增大，因而倍率降低到 0.7（一般用五角棱镜的为 0.85 左右）。图(b)中的布置较图(a)紧凑。图(c)则是一种可以作平视取景和俯视取景变换的结构布置。

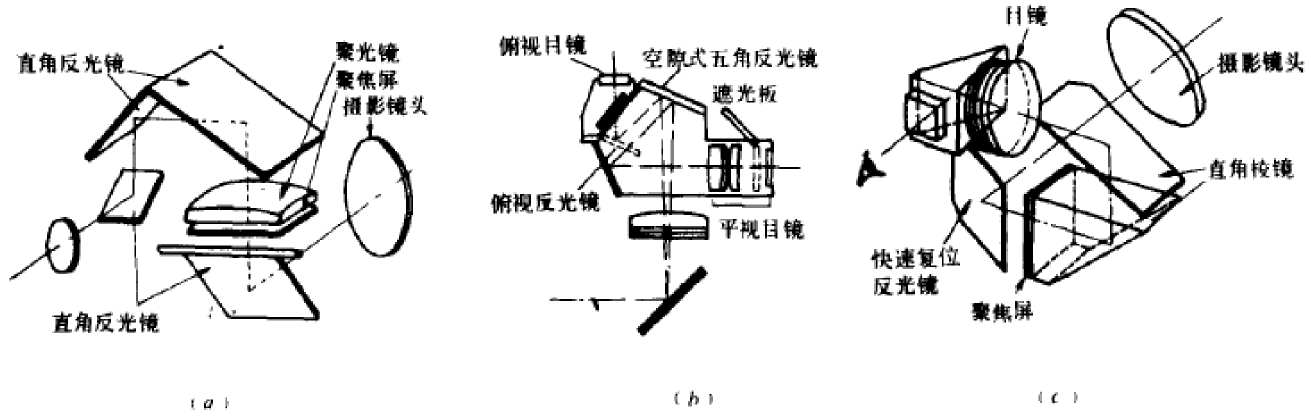


图 7-8 几种单反相机中的实像式取景系统

§7-3 取景视差和消视差机构

取景系统的光轴和摄影系统的光轴不相重合，从而使取景范围与底片上实际构图范围不一致的情况，称为取景视差。

如图 7-9，对于距离 p 的物平面 GG，底片上的构图范围为 TT，而取景范围却是 SS。能在底片中央成像的物点 A，却不在取景视场的中央，而是偏离一个距离 e，e 称为视差量。

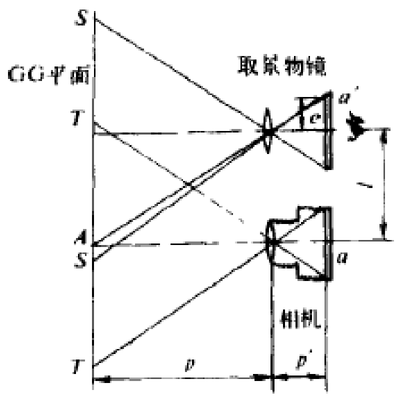


图 7-9 取景视差

由相似三角形关系可得

$$e = l\frac{p'}{p}$$

又由几何光学可知

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f'}$$

于是可有

$$e = l\frac{f'}{p - f'} \qquad (7\text{-}1)$$

其中 l、f' 为结构常数，因此视差量 e 随物距 p 而变化。校正取景视差的机构随相机的结构和取景方式不同而异。但它们都必然与测距调焦机构相关联。下面介绍两种。

1. 采用虚像式取景器照相机的消视差机构 135 平视取景照相机（参看图 2-1）一般采用逆伽里略望远系统的虚像式取景器。这类相机中，取景窗和摄影物镜的位置，在纵、横方向都有一段偏移量（图 7-10）。为了消除视差，往往采用移动亮框的办法。

求亮框移动量应满足的关系：由图 7-11，设 Q,Q',Q''分别表示取景系统入瞳、出瞳和亮框入瞳的位置，则由几何光学可知，取景系统的角放大率

$$\gamma_{取} = \mathrm{tg}\theta' / \mathrm{tg}'\theta$$

以及亮框系统的角放大率

$$\gamma_{亮} = \mathrm{tg}\theta' / \mathrm{tg}\theta''$$

要使 A 点与亮框中心重合，则亮框应移动 ε

$$\varepsilon = m\text{tg}\theta'' = m\frac{\gamma_{取}}{\gamma_{亮}}\text{tg}\theta = m\frac{\gamma_{取}}{\gamma_{亮}}\frac{l}{L-c}$$

其中　$l=\sqrt{l_{纵}^2+l_{横}^2}$。

取景器结构确定后，$m,\gamma_{取},\gamma_{亮},l,c$ 均为已知常数，于是根据不同的摄影距离 L，即可求得消视差亮框的移动量 ε。

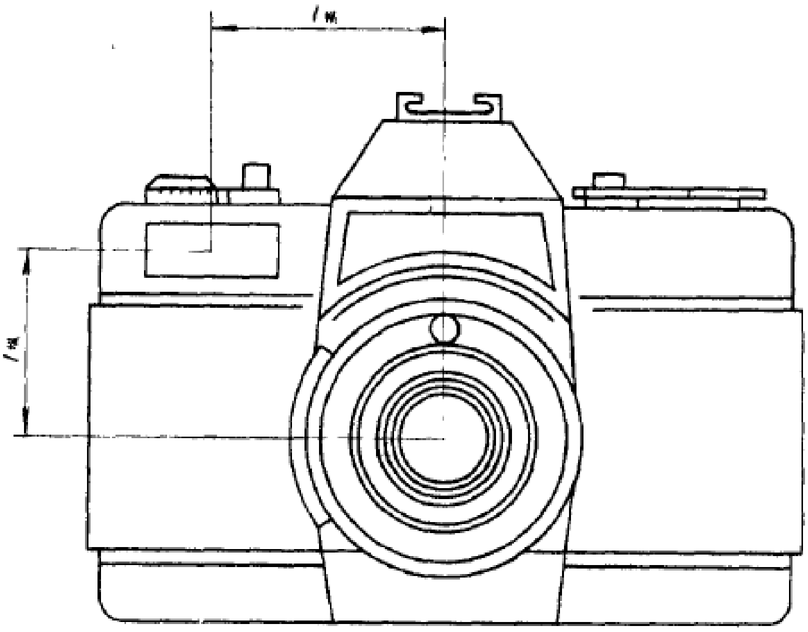


图 7-10　取景窗相对于摄影物镜的偏移

图 7-12 为莱卡 M3 型相机取景测距机构简图。当对不同物距调焦时，转动物镜实现前后移动，物镜框上端面凸轮 1 推动滚子 2，从而使与滚子 2 连在一起的杠杆 3 及杠杆 3 上的销钉 4 转动，销钉 4 拨动亮框沿斜槽实现纵横移动来消视差。

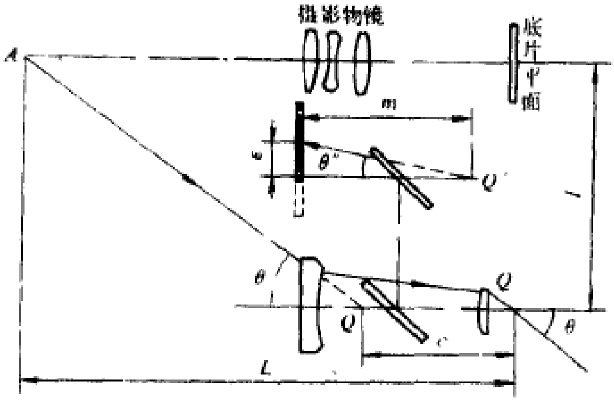


图 7-11　移动亮框消除取景视差

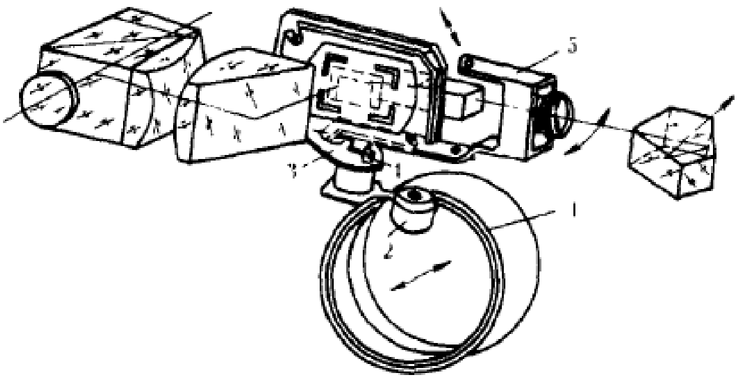


图 7-12　莱卡 M3 型相机取景测距机构

如前所述，由于底片幅面大小为一定，因此随着拍摄距离远近不同，所对应的视场角大小也是不同的。这样，在测距调焦过程中，除了亮框中心应作消除取景视差的移动外，亮框的大小也应随着拍摄距离的移近而作相应的缩小。例如图 7-13(*a*)表示对焦在无限远和对焦在 1m 距离时亮框应有的大小和位置。在实际结构中，为了简单起见，一般采用两种方式。最简单的是亮框不再移动，而是把亮框做成如图 7-13(*b*)中所示的形式，即增加了表示最近距离视场的亮框线。另一种方式是将亮框板做成两层[如图 7-13(*c*)所示]，其中一层固定不动，另一层随测距调焦动作移动。

2. 采用实像式取景器的双镜头反光照相机的消视差机构　图 7-14 是这种机构的示意图。测距调焦时物镜框 4 向前后移动，通过连杆 5 使两框架 3 摆动，从而使固定在摆动框架 3 上的

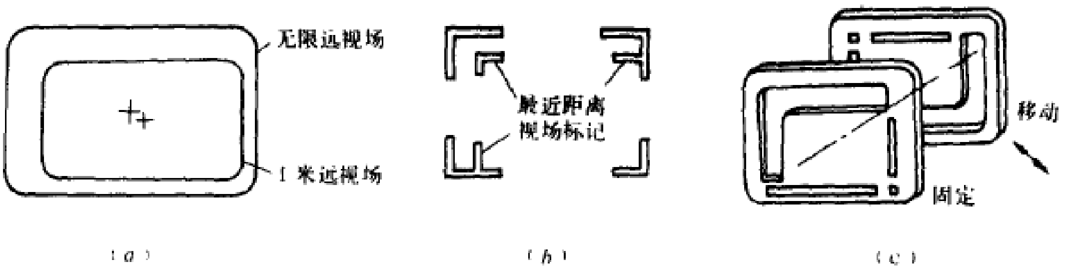


图 7-13　亮框大小和位置应随对焦距离而异

毛玻璃 1 作前后移动。毛玻璃 1 的移动方向应与物镜移动方向相反，移动量 ε 则应等于视差量 e。

由图 7-15，设被摄物体位于 A 点，则要使 A 点在底片上成像，镜头应向前移动 x'。由牛顿公式

$$x' = \frac{ff'}{x} = \frac{ff'}{p-f}$$

如设 $f = f'$，并由(7-1)式可得

$$e = l\frac{x'}{f'}$$

又毛玻璃的位移量 ε 与框架摆动的关系为

$$\varepsilon = \frac{r}{R}x'$$

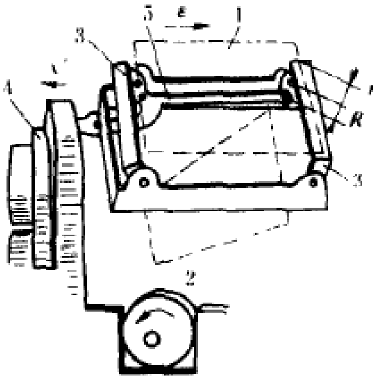


图 7-14　双镜头反光相机的消视差机构

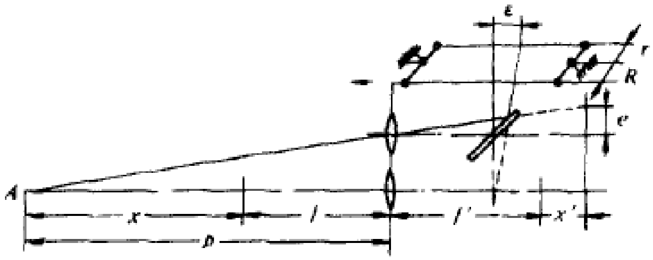


图 7-15　双镜头反光相机的消视差机构原理图

当毛玻璃后移量 ε 等于视差量 e 时，A 点落在取景毛玻璃的中心，于是消除了视差。故得消视差的结构条件为

$$\frac{r}{R} = \frac{l}{f'}$$

这就是这种消视差机构摆动臂之比应满足的关系。

上面讨论的主要是一般摄影用的小型照相机的情况。对于远程摄影机，由于物镜焦距很长，而底片幅面有限，因此视场一般都很小(只有几度)，同时因为距离远、目标的尺寸又较小，为了便于搜捕和对准被摄目标，就需要配备视场较大(几十度)、放大倍数较大(例如 4～6×)的望远系统作为观察取景系统。为了能够在观察视场内标出取景范围，一般采用实像望远系统，以便在物镜和目镜的重合焦平面上有可能放置刻有取景范围的分划板。在这类系统中，因为物距远大于取景系统光轴与摄影系统光轴间的不重合量，因此取景视差可以忽略不计。

第八章　调焦系统

在几何光学中，我们熟悉表示物像共轭关系的牛顿公式 $xx' = f'^2$ 。应用到摄影中，就是说，当我们拍摄不同距离的物体时，应当调节物镜和底片之间的距离，使底片放在与被摄物平面共轭的像平面上，这就是摄影中通常所说的调焦或对焦。调焦过程往往同时也就是测距过程，而且通常总是在观察取景的视场里完成的。

§8-1　焦深和景深

一、焦深

当底片平面与物平面精确共轭时，如图 8-1（图中 M，M'分别表示摄影物镜的入瞳和出瞳，并假设它们的直径相等），如果光学系统是理想光学系统，由物平面上的一点在底片上也成一像点，否则，底片上得到的是一个弥散圆像。但是当弥散圆的直径 δ' 不大于人眼分辨率时，则人们看上去，该弥散圆还可认为是清晰的像点。同样，当底片平面偏离理想共轭像平面时，一个物点在底片平面上的像也成一弥散圆斑。由图可见，圆斑的直径与底片平面偏离成像平面的距离成正比。对于给定的物平面 A，由允许的圆斑直径 δ' 所决定的底片沿光轴方向偏离共轭像平面 A'的距离就叫做焦深。

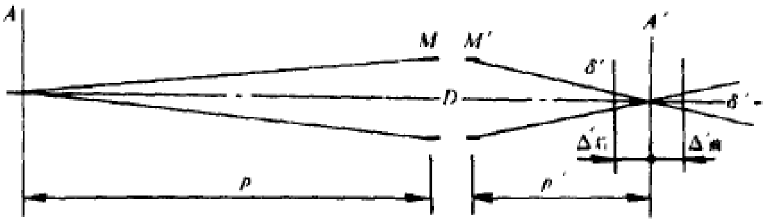


图 8-1　说明焦深的光学原理图

由图 8-1 可见，前焦深 $\Delta'_{前}$和后焦深 $\Delta'_{后}$相等，即

$$\Delta'_{前} = \Delta'_{后} = \frac{\delta' p'}{D} \tag{8-1}$$

当 $p \gg f$ 时，$p' \approx f'$，则有

$$\Delta'_{前} = \Delta'_{后} = \frac{\delta' p'}{D} = \delta' F \tag{8-2}$$

即焦深大小与一个物镜的 F 数成正比（与相对孔径成反比）。

二、景深

底片是一个平面，它只能与物平面共轭，而在摄影中，除了被拍摄的主体（它往往也不是一个平面）外，我们还希望被摄主体前后一定物空间深度上的景物（衬景）也都能清晰地记录在底片上。这就是摄影中常说的景深问题。

由图 8-2，当物镜对物平面 A 调焦时，底片应放在 A 平面的共轭平面 A'上，a 点的共轭像点为 a'。这时，位于物平面 A 前后的 B 平面和 C 平面，它们分别也有各自的共轭像平面 B'和 C'。这些平面上的物点 b 和 c 在 A 平面上的投影是一些圆斑 δ，对应它们在像平面 A'上的像也

将是一些直径为δ'的弥散圆。

同样，只要δ'不大于人眼分辨率，则仍可认为是清晰的像点。与此相对应的物距范围$\Delta_{前}$和$\Delta_{后}$就叫做调焦在A平面时的景深。但在摄影机上，为了能使摄影者对拍摄景物的清晰范围有一个更为直观的概念，一般均用$p_{前}$和$p_{后}$来表示景深的范围。

由图 8-2 显然有

$$p_{前}=\frac{Dp}{D+\delta},\quad p_{后}=\frac{Dp}{D-\delta} \tag{8-3}$$

以及

$$\Delta_{前}=p-p_{前}=\frac{p\delta}{D+\delta},\quad \Delta_{后}=p_{后}-p=\frac{p\delta}{D-\delta} \tag{8-4}$$

由(8-4)式可见，前景深要比后景深小。

我们来求景深和弥散圆δ'之间的关系式。由几何光学有，物镜的垂轴放大率$\beta=f'/x=\delta'/\delta$。在一般摄影时，$x\gg f'$，故可认为$x\approx p$，于是有

$$\delta=\delta'\frac{p}{f'}$$

代入(8-3)式，并用F(数)$=f'/D$代入，最后得

$$p_{前}=\frac{pf'^2}{f'^2+\delta'pF},p_{后}=\frac{pf'^2}{f'^2-\delta'pF} \tag{8-5}$$

由(8-5)式可见，景深的大小取决于物镜的相对孔径(或F数)、焦距、允许弥散圆的直径以及物距。焦距长、相对孔径大的物镜景深小。物距愈短，景深愈小。

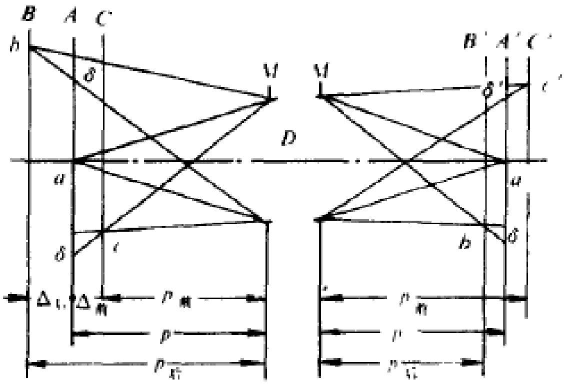


图 8-2 说明景深的光学原理图

景深与允许弥散圆直径δ'的大小成正比。而$\delta'_{允}$的大小，又和对摄影像质的要求、观察像所用的方法等许多因素有关。一般可这样选取：

(1)小相机中，若由明视距离看最后得到的相片，取

$$\delta'_{允}=f'/1000\sim f'/2000$$

式中f'为相机焦距。

如普通 135 相机，标准(常焦)镜头f'在 50mm 左右，考虑到底片放大使用，取$\delta'_{允}=f'/1500\approx0.033$mm。

(2)若观察小幅面底片所成的影像与观察距离无关(如电影、幻灯投影等)。这时$\delta'_{允}$的推荐值为

7.85mm 电影胶卷　$\delta'_{允}=0.012$mm

16 或 35mm 电影胶卷　$\delta'_{允}=0.025$mm

(3)另一种规定$\delta'_{允}$的方法是取$\delta'_{允}=1/R_{底}$，式中$R_{底}$是底片的分辨率(l/mm)。

(4)在航空摄影中有时直接取$\delta'_{允}=0.1$mm。

表 8-1 是普通 135 相机($f'=50$mm)的景深表，该表是按$\delta'_{允}=0.05$mm 计算得到的。

这里需要强调的是，景深和前面所讨论的焦深虽然都是从允许弥散圆δ'出发来确定的，但是从图 8-1 和图 8-2 显然可见，焦深是对确定的物平面而言，而景深则是从确定的底片平面出发来讨论的，它们之间并无共轭关系。

表 8-1 普通 135 相机($f'=50$mm)的景深表 ($\delta'=0.05$mm)

调焦距离(m)	景深界限至物镜的距离(m)					
	F2 $p_\infty=25$①	F2.8 $p_\infty=18$	F4 $p_\infty=12.5$	F5.6 $p_\infty=9$	F8 $p_\infty=6.25$	F11 $p_\infty=4.5$
1.5	1.42 1.60	1.38 1.64	1.34 1.70	1.29 1.80	1.21 1.97	1.13 2.25
2	1.85 2.17	1.80 2.25	1.72 2.38	1.64 2.51	1.52 2.94	1.38 3.60
3	2.68 3.41	2.57 3.80	2.42 3.95	2.25 4.50	2.03 5.77	1.80 9
5	4.17 6.25	3.91 6.92	3.57 8.33	3.21 11.25	2.78 25	2.37 ∞
8	6.06 11.76	5.54 14.40	4.88 22.22	4.24 72	3.51	2.88 ∞
10	7.14 16.67	6.43 22.50	5.56 50	4.74 ∞	3.85 ∞	3.10 ∞
∞	25 ∞	18 ∞	12.50 ∞	9 ∞	6.25 ∞	4.50 ∞

①:表中 p_∞ 为超焦距离,见上面的定义和(8-6)式。

现在我们来研究一种特殊情况,即,令 $p_后=\infty$,并设(8-5)式中的 δ' 为允许弥散圆的直径,则这时对应的调焦距离 p,称为无限远起点,或称为超焦距离,记为 p_∞。于是(8-5)式的第二式可以写成

$$\infty=\frac{p_\infty f'^2}{f'^2-\delta p_\infty F}$$

此式成立的条件是等式右边分母等于零,即

$$f'^2-\delta' p_\infty F=0$$

于是求得超焦距离

$$p_\infty=f'^2/\delta' F \tag{8-6}$$

将(8-6)式代入(8-5)式有

$$p_前=\frac{p_\infty p}{p_\infty+p},\quad p_后=\frac{p_\infty p}{p_\infty-p} \tag{8-7}$$

并可求得

$$\left.\begin{aligned}&\text{前景深}\quad \Delta_前=p-p_前=\frac{p^2}{p_\infty+p}\\&\text{后景深}\quad \Delta_后=p_后-p=\frac{p^2}{p_\infty-p}\\&\text{全景深}\quad \Delta=\Delta_前+\Delta_后=\frac{2p_\infty p^2}{p_\infty^2-p^2}\end{aligned}\right\} \tag{8-8}$$

当 $p=p_\infty$ 时,由(8-7)式可得 $p_后=\infty$ 及 $p_前=p_\infty/2$。这就是说,当物镜调焦在超焦距离上时,物空间由 $p_\infty/2$ 至无限远范围内的景物均能在底片上清晰成像。对比将物镜调焦在无限远(即将底片安放在物镜的焦平面上)的情形,由(8-7)式可得

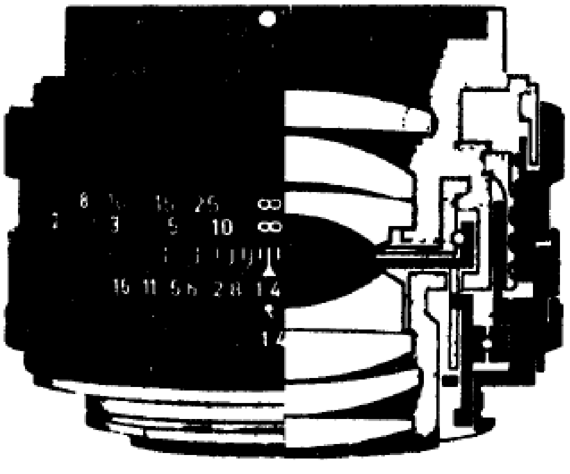


图 8-3 距离标尺和不同光圈时的景深范围指示

$p_{前}=p_{\infty}$。可见，其景深要比调焦在超焦距离时小 $p_{\infty}/2$。所以，一般相机中，为了增加景深，距离刻度的“∞”，实际上并不对应于物镜调焦在无限远，而是对应于物镜调焦在最大孔径时的超焦距离上。

为了指示摄影时的景深范围，小相机上都刻有指示景深范围的标尺，如图 8-3 所示。图中上面二行是距离标尺（分别以呎和米为单位），下面一行表示不同 F 数时的景深范围（图中只表示了前景深一侧）。

§8-2 调焦方式和调焦机构

既然调焦的目的是使底片平面和与选定的物平面共轭的像平面相重合，因此可以采用两种方式来实现调焦：固定物镜移动底片平面，或是固定底片平面移动物镜。

一般摄影机中，底片平面是固定不动的，这是因为从结构上考虑，这样做更易于保证底片平面的平整和与物镜光轴保持成垂直，因此，一般都采用沿光轴前后移动物镜的方法来调焦。结构上常采用多头螺纹副，调焦时拧动物镜框上的调焦环使物镜作前后移动。也可以采用其它传动机构，例如，大型皮腔式相机多采用齿轮齿条机构（图 8-4），双镜头反光照相机则有采用偏心凸轮传动机构的（图 8-5）。

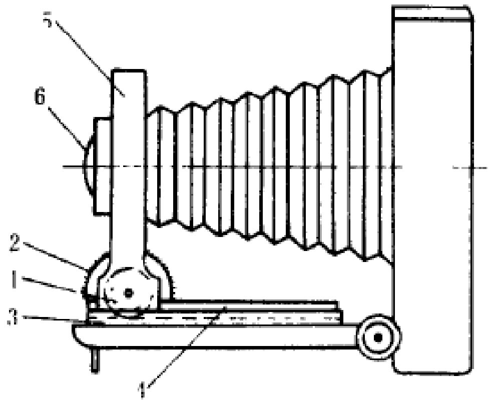


图 8-4　齿轮齿条调焦机构

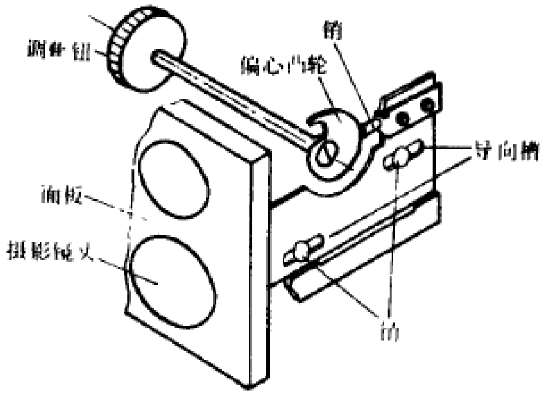


图 8-5　偏心凸轮调焦机构

一般来说，对于固定焦距的镜头，各组透镜之间的距离间隔是按光学设计时像差要求确定的，改变各组透镜之间的距离，固然可以改变整个镜头的焦距，从而达到调焦的目的，但影像质量将因之变坏。因此用移动镜头调焦时都以整个镜头作为整体沿光轴前后移动。少数廉价的照相机中，为了使镜头小型、轻量化，尽量使结构简单便宜，也有将镜头中与光圈及其它机构组合在一起的后组透镜轴向保持固定不变，而仅靠移动前组透镜来调焦。这种相机由于像差的限制而使最近的拍摄距离不可能很短。在一些望远镜头和变倍镜头中，由于整个镜头的体积、重量很大，便保持整个镜头固定不动，调焦时仅移动主镜头筒内部的中间透镜组（图 8-6）或后透镜组。

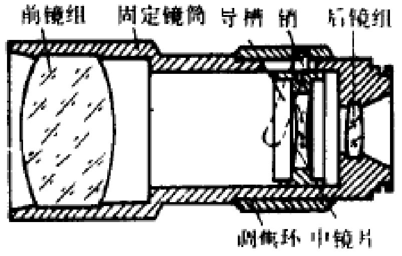


图 8-6　移动中间透镜组调焦

移动底片的调焦方式在大型照相机和外拍机中有采用。

调焦的方法可以分成五类：(1)根据距离标尺来调焦，(2)分段按景来调焦，(3)用单目测距器来调焦，(4)用观察调焦屏上成像清晰来调焦以及(5)自动调焦。

前两类方法均是由拍摄者目测或步量估计到被摄对象的距离，然后按所估距离将镜头调

到适当的位置，而并不是精确地使像的平面与底片平面重合，在这里先作简单介绍。其余三类则在§8-3～§8-5中分别作较仔细的讨论。

1. 按距离标尺调焦 用任何方法测量(例如用目测估计或步量)到被摄物体的距离，然后转动物镜框上的调焦环，使距离指标对准距离标尺上的相应距离值，即完成调焦。这种方法的调焦精度，主要取决于测量物距的准确程度。

摄影物镜距离刻度圈上的距离标尺是根据物镜移动量来计算的。物镜的移动量与摄影距离间的关系，由牛顿公式有

$$x' = \frac{f'^2}{x} = \frac{f'^2}{L - c - x'}.$$

式中 L 为计算到底片平面的物距，见图(8-7)；c 为镜头常数＝焦点 F、F' 间距离。
解上式得

$$x' = \frac{(L-c) - \sqrt{(L-c)^2 - 4f'^2}}{2} \tag{8-9}$$

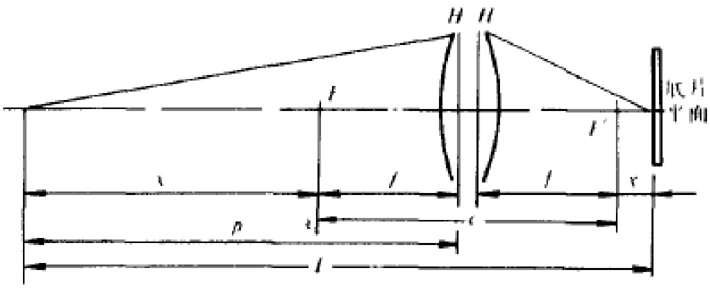


图 8-7 物镜移动量与摄影距离间的关系

当物镜调焦在超焦距离 p_∞ 上时，距离标尺上对应"∞"的位置，即 $L = L_\infty$ 时，$x' = x'_{min}$。因 $L_\infty \gg c \gg x'_{min}$，故可直接写出

$$x'_{min} \approx f'^2 / L_\infty$$

当对最近摄影距离调焦时，$x' = x'_{max}$。调焦环应转过小于一周(一般取转角 $\gamma = 200 \sim 300°$)。于是可求得物镜多头螺纹的螺距 s 应为

$$s = \frac{360}{n\gamma}(x'_{max} - x'_{min})$$

式中 n 为多头螺纹的头数。

调焦环上任意两距离刻度$(i+1, i)$之间的角距离$(\gamma_{i+1} - \gamma_i)$应为

$$\begin{aligned}\Delta\gamma_{i+1} = \gamma_{i+1} - \gamma_i &= \frac{360}{ns}(x'_{i+1} - x'_i) \\ &= \frac{180}{ns}\Big[(L_{i+1} - L_i) - \sqrt{(L_{i+1} - c)^2 - 4f'^2} \\ &\quad + \sqrt{(L_i - c)^2 - 4f'^2}\Big]\end{aligned} \tag{8-10}$$

根据上式可以计算出距离环上各距离刻度的位置。

2. 按景深分段调焦 这种调焦方法常用在一些价廉简易的小型照相机上。它是把拍摄景物划分成远景、中景、近景等3到5个区域，调焦时只需按所刻的图案记号将物镜转动到这有限几个位置中的一个。由于这种相机的镜头焦距较短，因此有足够的景深可保证拍摄的景物在底片上清晰成像。

各段的对焦位置可由远及近按下述步骤用(8-5)式计算得到(参看图 8-8)。

令 $p_1 = p_\infty = f'^2/\delta' F_{\min}$，则有 $p_{1后} = \infty$，$p_{1前} = p_\infty/2$，得到第 1 区和第 2 区的分界点，即 $p_{2后} = p_{1前} = p_\infty/2$。代入(8-5)式于是可得

$$p_2 = \frac{p_{2后} f'^2}{f'^2 + \delta' p_{2后} F_{\min}} = \frac{1}{3} p_\infty$$

及

$$p_{2前} = \frac{\frac{1}{3} p_\infty f'^2}{f'^2 + \delta' \frac{p_\infty}{3} F_{\min}} = \frac{1}{4} p_\infty$$

相类似地，我们可以推导出各段的普遍表达式

$$\left.\begin{aligned} p_{i后} &= p_{(i-1)前} = \frac{1}{2(i-1)} p_\infty \\ p_i &= \frac{1}{2i-1} p_\infty \\ p_{i前} &= \frac{1}{2i} p_\infty \end{aligned}\right\} \tag{8-11}$$

同时由 $p_{\min} \approx p_{K前} = \frac{1}{2K} p_\infty$ 可得分段数(取整数)

$$K = \frac{p_\infty}{2 p_{\min}} \tag{8-12}$$

代表各段距离的图案常常也直接显示在取景视场的边上，如图 8-9 所示。可以采用小灯照亮左侧图案中的一个或用指针指出其中所装定的一个。

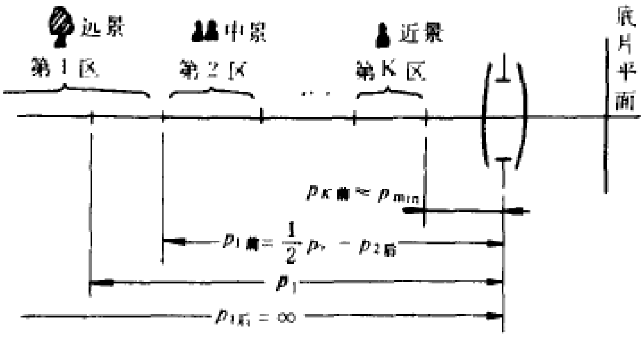


图 8-8　分段对焦位置的确定

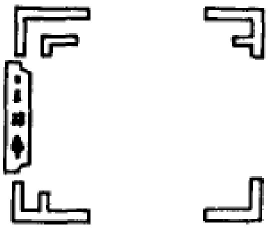


图 8-9　对焦区域的显示形式

§8-3　光学测距器

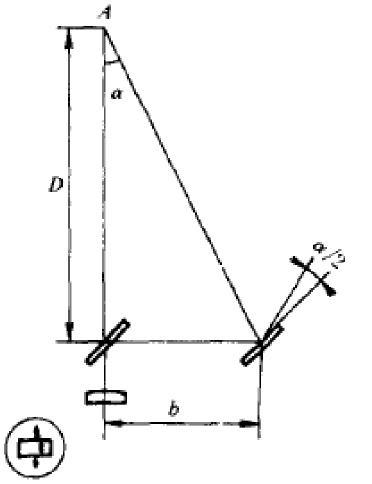


图 8-10　基线式单目光学测距原理

在平视式照相机中通常采用基线式单目光学测距器来实现测距和调焦。

基线式单目光学测距器的测距原理如图 8-10 中所示。图中左边是局部镀膜反射镜，它的形式可以是多种多样的设计，图 8-10 只是示意地表示一种形式，即中间一小块反射右边来的光线，其余大部分视场则为透射左前方直接进入的光线。最后人眼看到的景物如左下方的小图所示的形式。

右边的摆动反射镜与摄影物镜连动，如图 8-11 中所示。拧

动镜头 8 对焦时，通过杠杆 7 使反射镜 B 摆动，从而使视场内的二部分影像重合。

由图 8-10 可见，测距反射镜的摆动角 $\alpha/2$ 与物点 A 的距离 D 之间有关系

$$\frac{\alpha}{2}=\frac{1}{2}\text{arc tg}\,\frac{b}{D} \tag{8-13}$$

式中 b 称为基线长。

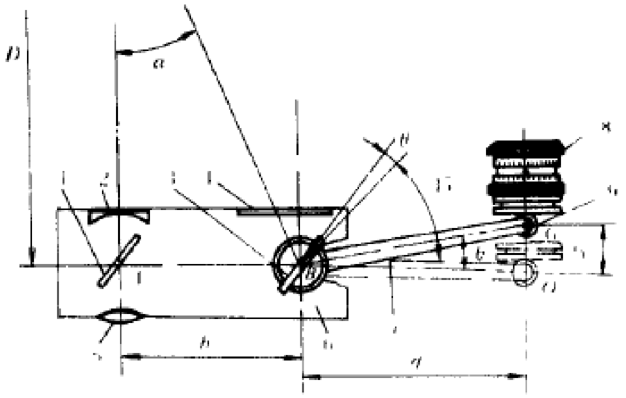
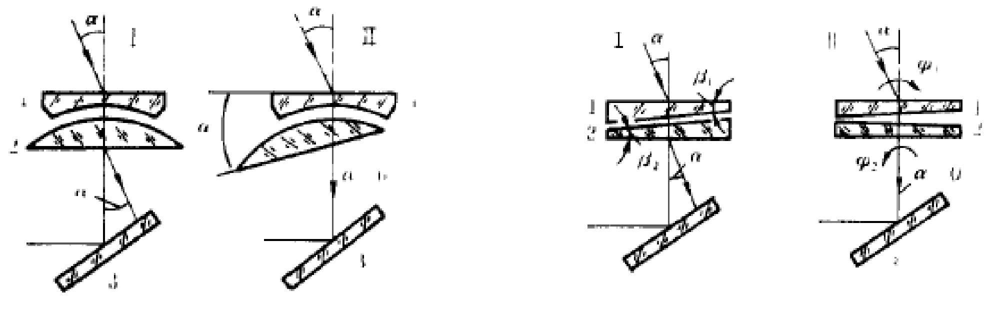


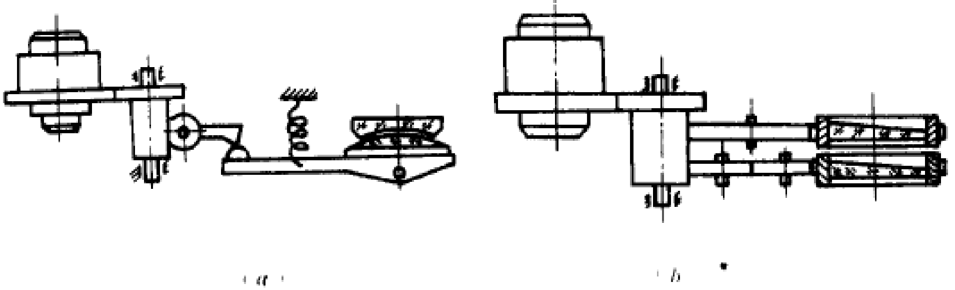
图 8-11　测距对焦连动机构

代替反射镜摆动，使右路光线偏折的方法很多，例如：可以在右光路反射镜前加一摆动透镜式[图 8-12，(*a*)]或旋转双光楔式[图 8-12，(*b*)]的补偿器，与镜头连动的结构则可如图 8-13 中所示的形式。这二种光学补偿器的实质都相当于一块楔角可变的光楔。由光楔楔角与偏折光线角度之间的基本关系式可容易地写出光学补偿器的转动角度与所测距离之间的关系(见表 8-2)。



(*a*) 摆动透镜式　　(*b*) 旋转双光楔式

图 8-12　光学补偿器



(*a*)　　(*b*)

图 8-13　光学补偿器与镜头的连动机构

也可以在固定的右反射镜后的光路中采用移动或摆动负透镜的方式使光线偏折，如图 8-14，(*a*)所示。沿垂直 BC 方向移动负透镜 3 或绕 BC 上某一点 M 摆动透镜 3，可以实现两部分像重合，这时透镜 3 的移动量或摆动量即代表 A 点的距离 D。由于 D 远大于光学系统的焦距，可以认为由 A 来的进入两支光路的都是平行光束。我们将左支光路安排成 A 点即位于光学系统 2 和 1 的光轴上，作为合像的基准，于是右支经固定反射镜 4 和 5 折转的光路可以简化成如图 8-14，(*b*)所示的情形。移动或转动透镜 3 使倾斜 α 角入射的平行光束最后成像在透镜 1 的光轴上，就可以完成合像和测距的任务，也就是说，由几何光学中物、像共轭关系的条件出发，作为透镜 1 的物，由 A 来的倾斜平行光束经透镜 3 所成的虚像 A'，应当位于透镜 1 的光轴上，如图 8-15 中所示，才能与由透镜 2 所成的像相重合。由图 8-15 并且不难推导出负透镜的位移或转角与所测距离之间的关系式。我们把这几种光学测距原理归纳于表 8-2 中。

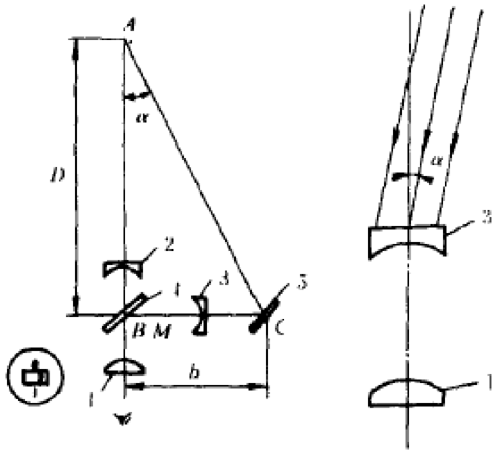


图 8-14　移动或摆动负透镜式测距器光学原理

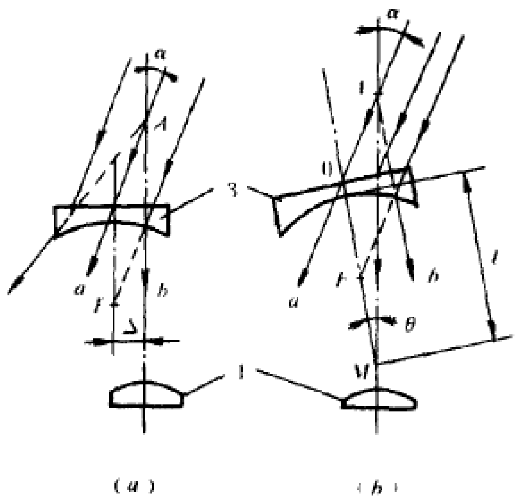
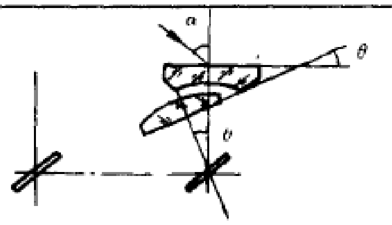
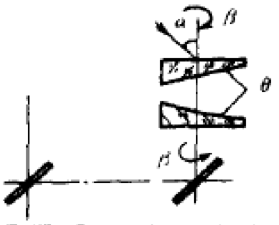
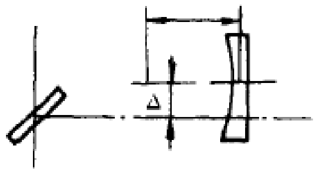
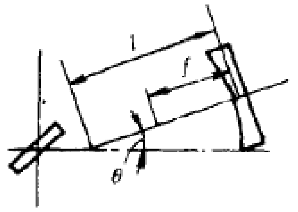


图 8-15　移动或摆动负透镜实现合像

表 8-2　几种光学测距方法

	结构简图	位移量与摄影距离的关系式
转动透镜式		转动中心与透镜球面中心重合时 $\theta=\frac{1}{n-1}\text{arc tg}\frac{b}{D}$
旋转双光楔式		$\beta=\cos^{-1}\left(\frac{1}{2\theta(n-1)}\text{arc tg}\frac{b}{D}\right)$
移动负透镜式		$\Delta=f\frac{b}{D}$
摆动负透镜式		$D=\frac{b(f/L+\sin^2\theta)}{\sin\theta\cos\theta}$

§8-4　对焦屏

用观察对焦屏上成像清晰程度来调焦的方法常用于单镜头或双镜头反光照相机中。

最简单的是用一个毛玻璃屏；调焦时，人眼直接或通过调焦放大镜（目镜）观看毛玻璃上被摄物体的影像，转动物镜框上的调焦环至毛玻璃屏上影像最清晰，即完成调焦。由于毛玻璃屏上的影像亮度很低以及焦深的影响（在一定范围内看来影像均是清晰的），这种方法对焦精度不高，因此需要采用更可靠的对焦方式。

各个照相机厂家生产的单反相机中，对焦屏的形式极为五花八门。图 8-16 是日本 Nikon

相机中可选用的一些对焦屏的形式。它们主要是由磨砂面(毛玻璃屏)、裂像光楔、微棱镜和菲涅耳环带透镜所组成的不同组合。前三者均可用以调焦,菲涅耳环带透镜则主要起聚光作用,以增加对焦屏上像的亮度。图 8-17 是一种典型组合形式。对焦屏的中心有一个直径 2 毫米左右的圆形裂像光楔,其外是规则排列的微棱镜,分布在直径 2 毫米至 5 毫米左右的环带内,再向外就是磨砂面。对焦屏的另一面为菲涅耳环带透镜。对焦屏由高透明度的光学塑料模压制成。

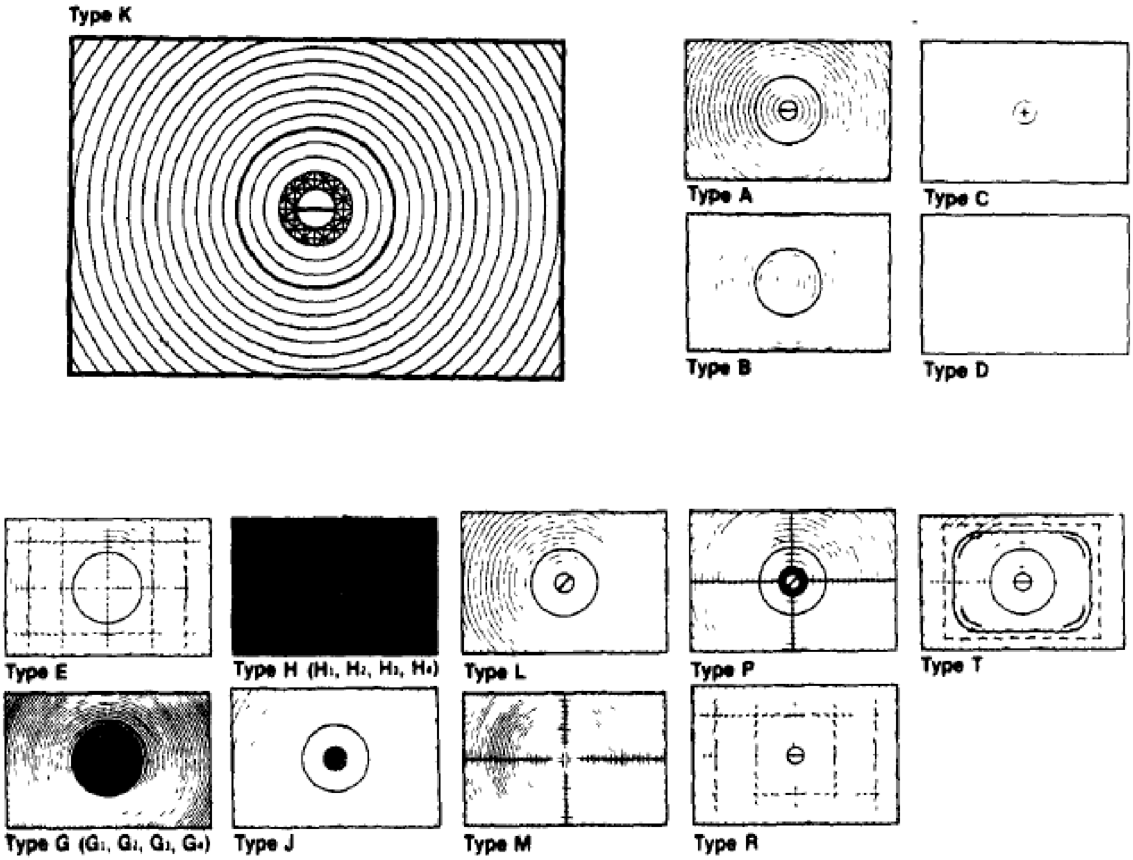


图 8-16 Nikon 相机的可更换对焦屏

下面我们主要讨论裂像光楔和微棱镜两种元件的测距对焦原理。

一、裂像光楔

裂像光楔也叫裂像棱镜。它的形状如图 8-18 中所示,可以想象成它是将圆柱体纵切成两半,再把半个圆柱体斜向切成两半,两半的楔角相等,然后斜面交叉,把纵切面粘合在一起构成。实际调焦光楔是用模压的方法成型的。裂像光楔一般做在观察调焦屏的中央部位。

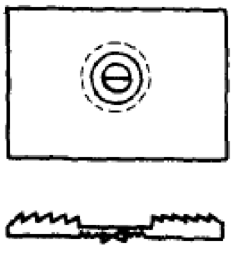


图 8-17 对焦屏的典型形式

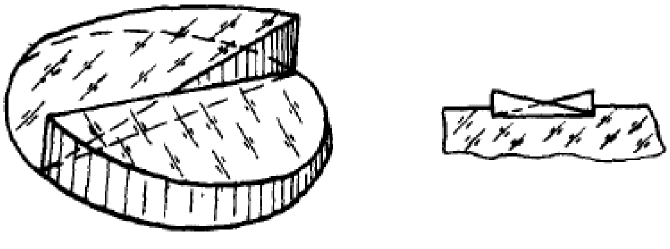


图 8-18 裂像光楔

用裂像光楔调焦的原理如图 8-19 所示。我们主要讨论轴上物点的情况。无论对焦正确〔图 8-19(*a*)〕或离焦〔图 8-19(*b*)〕,轴上物点的像点 P 发出的光束,在通过裂像光楔时,一半光束经过光楔 A,另一半光束经过光楔 B,它们分别要向两光楔的底的方向偏折。所以,P 点通过裂像

光楔二次成像时，将形成两个位置不同光的像点 P_1 和 P_2。当对焦正确时，像点 P 位于楔 A 和 B 斜面的交点所在的 MM 平面内，它通过裂像光楔后的两个像点仅在物镜光轴方向(轴向)有少量偏移〔图 8-19(a)中未表示〕，在垂直光轴方向(横向)没有偏移。因此，通过目镜观察轴上物点的像时仍然重合为一点 P。若观察一个垂直于裂像光楔胶合面的竖直线或杆时，所看到的像如图 8-20(a)所示。在离焦的情况下，无论像点 P 位于 MM 平面的前面〔如图 8-19(b)所示〕，还是位于 MM 平面后面，它的两半光束通过光楔 A 和 B 所成的像点 P_1 和 P_2，不仅在轴向有偏移，而且在横向还会错开。通过目镜观察时就会看到两个左右错开的像点。离焦的像平面若在 MM 平面之前，竖直物上半部向左偏移，下半部向右偏移，如 图 8-20(b)所示。离焦的像平面若在 MM 平面之后，上、下两半部分偏移的方向相反，如图 8-20(c)所示。因此，根据 P_1 和 P_2 的偏移方向可以判断离焦的方向。由于裂像光楔只占对焦屏中央一小块面积，视场很小。在它视场范围内的轴外点，通过裂像光楔二次成像后的像点错移情况，无论对焦正确或离焦，都与轴上点十分接近，故以上关于轴上点的讨论也适用于轴外点。

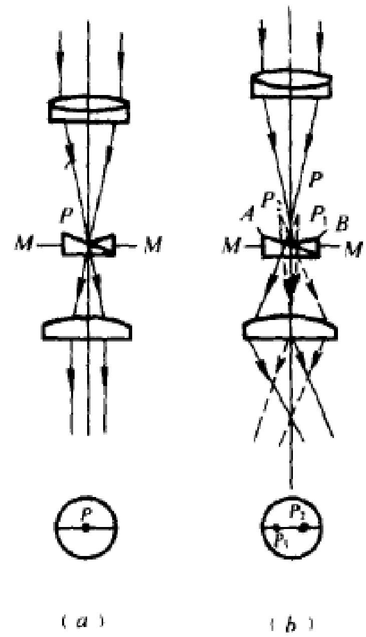


图 8-19 用裂像光楔调焦工作原理

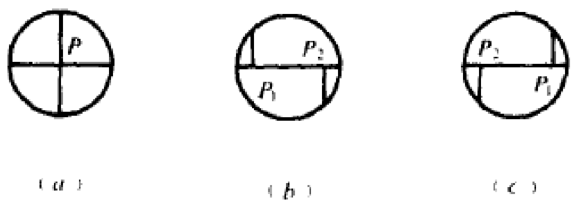


图 8-20 通过目镜看到的不同对焦情形的影像

图 8-21 是用毛玻璃屏和裂像光楔组合对焦屏调焦的情形。由图可见，当裂像光楔的像岔开时，毛玻璃屏上的像同时也模糊不清晰。

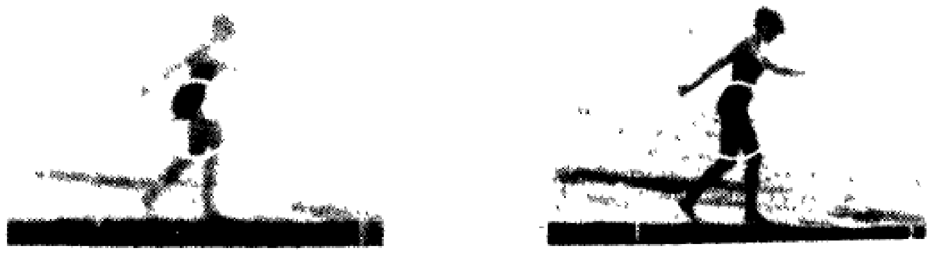


图 8-21 用毛玻璃屏和裂像光楔组合调焦的情形

人眼分辨线条错移的能力(一般为 10″)要比分辨像点模糊程度的能力(一般为 1′)大。由此可见，当被摄物体有上述方向的明显线条时，这种方法的调焦精度可以相当高。

当离焦量为一定时，影像分离的大小与光楔的楔角大小有关。由图 8-22，近似地有

$$e = \Delta x' \mathrm{tg}\mu$$

而光楔楔角 ω 与偏向角 μ 之间有关系

$$\mu \approx (n-1)\omega \approx \omega/2$$

式中 $n \approx 1.5$ 为裂像光楔玻璃折射率。

合并以上两式可得

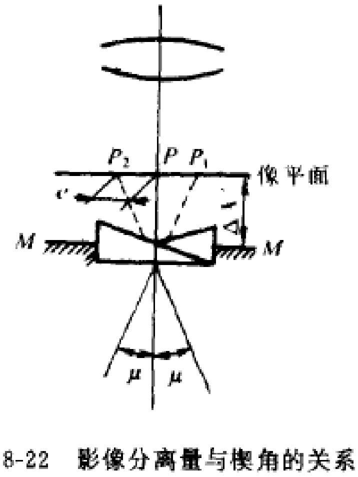


图 8-22 影像分离量与楔角的关系

$$e = \Delta x' \operatorname{tg} \frac{\omega}{2}$$

影像分离值 e 可根据人眼对两平行直线的角分辨率 α 来确定。大多数照相机是通过目镜来观察对焦屏的。对于焦距为 f'_e 的目镜来说，有

$$e \approx \frac{1}{2}\alpha f'_e$$

于是可以确定这种调焦方法的调焦精度 $\Delta x'$：

$$\Delta x' = \frac{\alpha f'_e}{2\operatorname{tg}(\omega/2)} \tag{8-14}$$

例如，当 $\alpha=10''$，$f'_e=70\text{mm}$，$\omega=10°$时，$\Delta x' \approx 0.02\text{mm}$。

但是考虑到裂像光楔对孔径的分割作用，选用的楔角大小还应受调焦镜头的光圈数的限制。图 8-23 表示光楔楔角大小对射入眼瞳光束口径的影响。在图(a)中光楔偏向角 $\mu=a$，这样光线 a 和 b 经上下两半光楔折射后，分别偏折成图中所示的情形。这就相当于使光瞳偏移成下面小图中所示的样子。落在其中一块光楔上的像点，只有画斜线的凸透镜形面积的光束能进入眼瞳。倘若进一步增大光楔楔角，如图 8-23(b)中所示，则光束经裂像光楔后能进入眼瞳的部分将大大减小，这时人眼将明显感觉到视场变暗。同时若人眼稍有移动，如图(b)下面小图中的虚线位置，即出现半部视场变黑的现象。这种现象，在(a)图的情形中同样存在，只是出现半部视场变黑以前，眼瞳移动的范围允许较大一些而已。

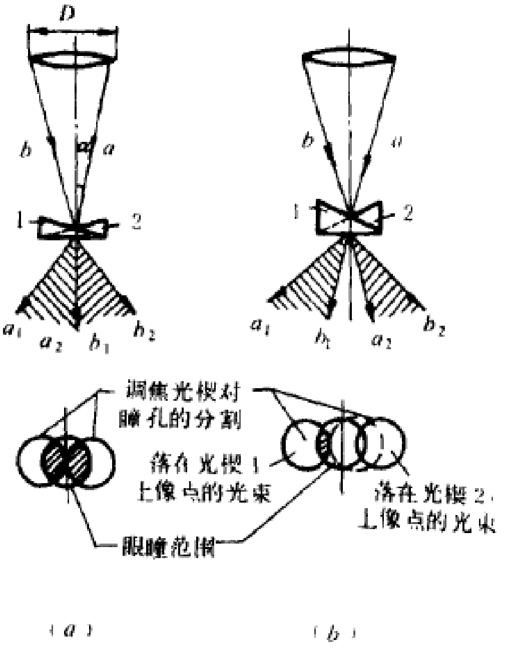


图 8-23　楔角大小对入射眼瞳光束口径的影响

裂像光楔的楔角一般不大于 10°。

二、微棱镜

微棱镜调焦屏是由许多细微的三角锥、四角锥或六角锥状棱镜规则排列而成的，一般用透明塑料热压成形。锥底边长 0.07～0.12mm，锥面与底面夹角约 6～10°[图 8-24(a)]。其工作原理和调焦光楔相同。图 8-24(b)中画出 P 点对焦时和离焦时的情形。在离焦时，微型棱镜把 P 点像在上下左右方向破分开。由于一小块棱镜很小，故在视场内总起来给人以影象模糊的感觉。当调焦正确时，影像则是清晰的。

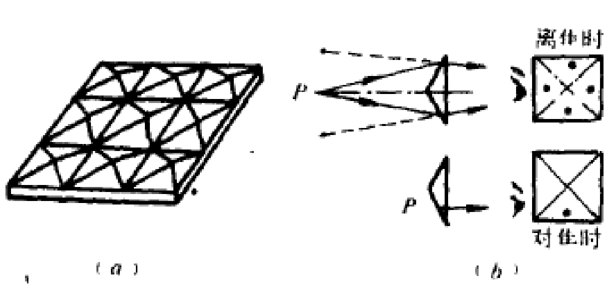


图 8-24　四角锥微棱镜调焦原理

微型棱镜的优点是调焦准确、迅速，它既不需要像调焦光楔那样要求被摄物体有明显的轮廓线条，又比毛玻璃所看到的像亮，调焦精度高。当对焦不正确时，影像边缘会呈现出一排排锯齿状的暗影，这种锯齿形的大小和微棱镜的大小相同。同时，当用手握持相机进行调焦时，由于手的颤动，这种锯齿状的暗影还会随手的颤动而改变位置，出现一种时现时隐的闪烁现

象。这就有助于摄影者觉察对焦的不正确。

§8-5 自动调焦系统

无论是用调焦屏调焦或是用测距器调焦,都需要人眼去发现像的模糊或不重合,然后操作物镜的调焦环通过连动机构来消除这种模糊或不重合。所谓自动调焦,就是用各种不同形式的自动对焦微型组件代替人的眼睛来发现像的模糊或不重合,然后由它直接操纵连动机构移动物镜,同时消除这种模糊或不重合。由此可见,从基本原理来说,自动调焦可以分成两大类:与观察调焦屏上成像清晰相对应的调焦方式叫做聚焦检测方式;与用单目测距器相对应的调焦方式叫做测距方式。

采用聚焦检测方式的自动调焦相机的品种目前尚不多(如 Pentax MEF,Nikon F3AF,Canon AL－1,Mamiya ZF 等),目前出品的自动调焦相机,多数采用测距方式①,这是因为前者在技术上难度要大很多。

8-5.1 测距方式的自动调焦

用于自动调焦的测距方式不仅有常规的带固定基线的三角测量法,还可以采用求取从发射脉冲到接受反射回来的回波之间时间的测速法。

一、三角测量法

它的测距原理和我们前面介绍的单眼测距器相同,但从基线两端来的物像的不重合程度则由光电元件来探测。

1. VAF 自动调焦组件 图 8-25 中所示为 Konica C35AF 的自动调焦机构,它的工作原理示意图如图 8-26 所示。这种自动调焦方式是美国 Honeywell 公司发明的,其中的自动调焦部件 VAF(Visitronic Auto Focus)组件也是由该公司专利制造提供各个照相机厂家配装于多种牌号的照相机和电影摄影机中。

两个测距物镜按一定的基线长度的间隔放置,测距物镜后面分别放上有相同数量测光元件所组成的阵列。

我们先来介绍自动调焦的动作过程,然后再讨论调焦原理。

参看图 8-25,在开始拍摄时,摄影镜头处在伸出位置,即对焦于最近处。

在卷片完了状态,按下快门释放按钮时,释放杆 4 下降,与释放杆 4 的销相连的钩子 6 也同时下降,自动调焦动作环 5 即在弹簧力作用下逆时针方向回转。与此同时,以销子与动作环 5 相靠的心形扫描凸轮 3 便在扭簧的作用力下水平向左运动,使与其连动的可动反射镜 2 作一次由起始的对无穷远距离转向近距离,然后又由近距离转向无穷远距离的往复扫描。在可动反射镜 2 扫描过程中,VAF 组件的测光元件阵列接受物像的光照后经电路处理会输出一个随扫描所对准的不同距离而变化的电压。在由远及近的前半周扫描中,当通过对焦正确位置时会输出一个最大值,这个最大值被记忆下来。

在可动反射镜 2 的由近距离对向无穷远距离扫描的后半周期,控制环 7 也向左回转。与此

① 参考文献[57]列表统计了 63 种自动调焦相机,绝大多数采用测距方式。

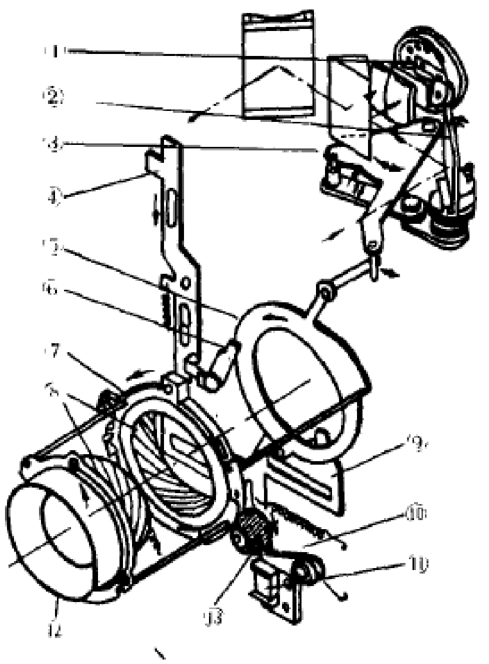


图 8-25 Konica C35 AF 的自动调焦机构

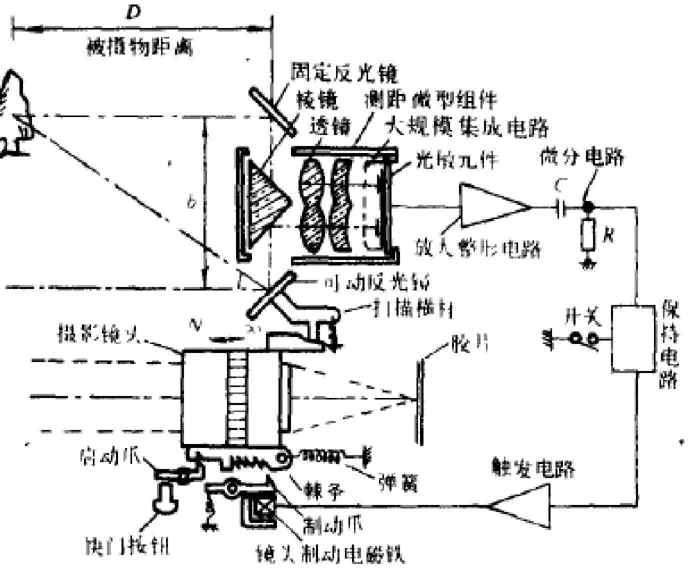


图 8-26 Konica C35 AF 的自动调焦系统工作原理示意图

同时，由两根销杆与环 7 相连的照相镜头 12 也随之向左旋转，并通过多头螺纹 8 而退回，即照相镜头也对景物作由近及远的对焦。当 VAF 组件在后半周期扫描中再次出现前半周期扫描中的最大输出时，电路输出一个停止信号，使电磁铁 11 的电流被切断，棘爪 10 借助弹簧力上跳钩住棘轮 13，因棘轮 13 上的齿轮与控制环 7 圆周上的齿圈相啮合，于是控制环 7 被制止转动，照相镜头即不再后退，自动调焦动作即告完成。

可见，反射镜 2 前半周期由远及近的扫描是为了检测被摄物体，存储其距离信息，这时镜头对焦于近距离保持不动，而后半周期由近及远扫描的同时才是摄影镜头由近及远的对焦过程。当对焦适当时，电路给出停止信号，摄影镜头停止运动，相机自动转入曝光过程。

曝光终了，当拨动卷片扳手，卷过已曝光的底片时，制动电磁铁由另外一个开关接通电源而将制动爪吸离棘轮，同时镜头重新被拉出，直到被启动爪钩住为止。

VAF 组件中的测光元件阵列可以如图 8-27 中所示的情形，图中画出为左右各五个元件的情形。

VAF 的电路系统包括相关信号获得电路和峰值检测电路两部分。相关信号获得电路如图 8-28 所示，但图中只画出了左右各四个元件的情形。

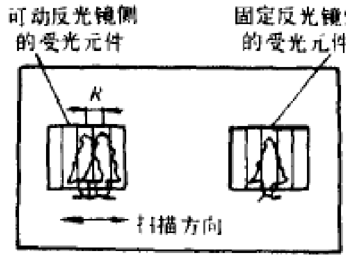


图 8-27 VAF 组件中的测光元件阵列

各个测光元件 P_i 和 P'_i 的各自响应分别为 e_i 和 e'_i，因此其后的差动放大器 A_{1i} 的输出信号是与两者的差 $e_i - e'_i$ 成正比。在 VAF 中采用对数压缩电路，即二极管 D_{1i} 使 e_i 和 e'_i 正比于测光元件接受的光照度 E_i 和 E'_i 的对数，即 $e_i = K\log E_i$，$e'_i = K\log E'_i$。因此差动放大器 A_{1i} 的输出信号将与 $\log(E_i/E'_i)$ 成正比。在对焦过程中，各个 E_i 保持恒定不变，而 E'_i 则随可动反射镜的扫描而不断改变，各个 A_{1i} 也将随之变化。当对焦正确时，两组测光元件上的影像一一对应相同，$E_i = E'_i$，因此 $e_i = e'_i$，放大器组 A_{1i} 的输出将等于零。

放大器组 A_{2i} 至放大器 A_{31} 和 A_{32} 的电路，完成将诸差动放大器 A_{1i} 的输出信号作绝对值相加的运算。当差动放大器 A_{1i} 的输出信号为正时($E_i > E'_i$)，经过正接的二极管组 D_{2i} 至放大器 A_{32} 相加后输出正的 e_0。当差动放大器 A_{1i} 的输出信号为负时($E_i < E'_i$)，则经过反接的二极管组

D_{31}送入反向放大器 A_{31}，反向放大器 A_{31}反转输入信号的符号，然后经过放大器 A_{32}也输出正的 e_0。这样，VAF 组件的电路输出 e_0 等于

$$e_0 = k\sum_i |\log(E_i/E'_i)| \tag{8-15}$$

即，当可动反射镜扫描通过所测距离点时，输出 e_0 应为极小(等于零)。由于零值信号的检测精度不高，实际生产的 VAF 求取的是极大值，即再采用一个倒相放大器，从供电电压 V_C 中减去 e_0，并把最后所得的电压信号称为相关信号 V_{co}(参看图 8-29，b)

$$V_{co} = V_C - e_O \tag{8-16}$$

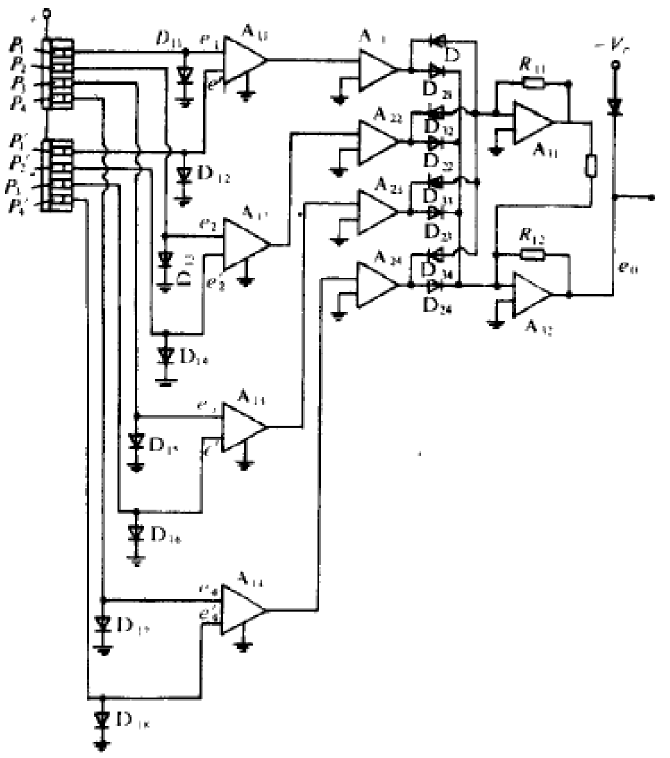


图 8-28　VAF 的相关信号获得电路

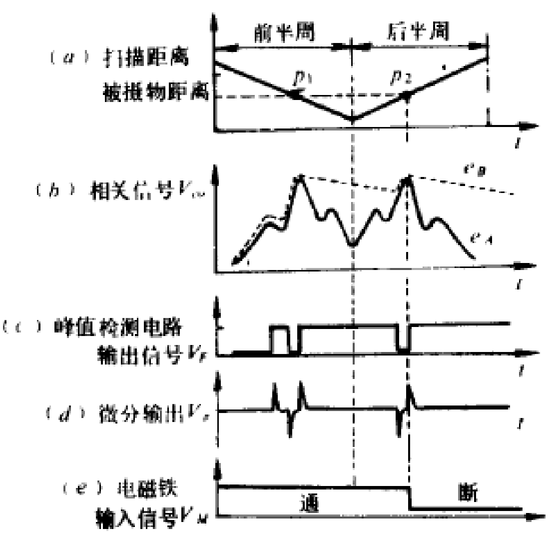


图 8-29　调焦扫描过程中的信号变化

下一步是如何从变化着的相关信号 V_{co}中得出自动调焦信号。

首先用峰值检测电路从相关信号 V_{co}中检测出它的最大值。峰值检测电路可以设计成各式各样的。图 8-30 所示为可行的一种电路设计。它的峰值检测原理如图 8-31 中所示。相关信号 V_{co} 分成两路输入运算放大器的两个输入端，其中一路并经电容 C 接地，因此当 V_{C0}随扫描上升时(图 8-31 中的 T_1-T_2 段)，e_B 的上升由于向 C 的充电而要慢于 e_A。但当 V_{C0}随扫描下降时(图 8-31 中的 T_2-T_3 段)，却又由于电阻 R 的阻值较大，C 的放电速度慢，而使 e_B 的下降也很慢[如图 8-31 和图 8-29(b)的虚线所示]。e_A 和 e_B 经运算放大器 A_4 比较并放大。由于 A_4 的开环放大倍数很高，只要 e_A 略大于 e_B，就达到负饱和状态；e_A 略小于 e_B，就达到正饱和状态。再经过二极管 D_4 输出的信号 V_F，就成为如图 8-29(c)所示的矩形波。当 V_{co}上升时，V_F 为低电平；当 V_{co}下降时，V_F 为高电平。

峰值检测电路的输出信号 V_F 经微分电路变成如图 8-29(d)所示的尖脉冲 V_P。V_F 的上升沿产生正脉冲，下降沿产生负脉冲。V_P 再经过一个开关去控制电磁铁 11(图 8-25)。这个开关在前半周断开，后半周接通，因此，尽管 V_P 在前半周可能有多个正脉冲和负脉冲，都不能改变电磁铁线圈的通电状态。V_P 在后半周只有一个负脉冲和一个正脉冲，它们可以通过接通的开

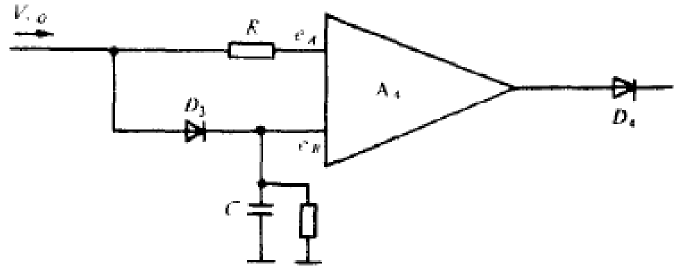


图 8-30　峰值检测电路

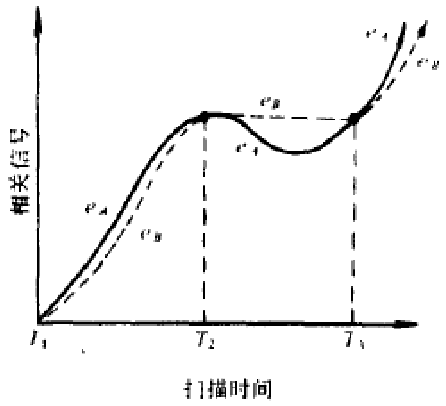


图 8-31　峰值检测原理

关去触发电磁铁驱动电路。虽然正脉冲对应于正确的对焦位置，然而考虑到机械系统的惯性，可以利用负脉冲使触发电路提前切断电磁铁线圈的电流，释放棘爪 10，使镜头停止在正确的对焦位置上。

2. SST 自动调焦部件　可动反光镜的扫描动作也可用探测器内部的电扫描来代替。参考文献[57]介绍了一种 SST(Solid State Triangulation)系统(图 8-32)，它不同于上述 VAF 的主要是，在这种原理的相机中，探测器用的是 CCD 阵列。两个测距窗后的反光镜都固定不动。从一个窗口来的像，经反光镜反射后落在探测器的固定位置上，例如由 250 元件组成的 CCD 阵列的前 50 个元件上，构成所谓基准像。从另一个窗口来的像，经另一端的反光镜反射后也落在同一探测器上，但它的位置与物体的距离有关。例如，如对焦于无限远物，则该物的像落在探测器另一端的 50 个元件上。如对焦在有限距离上，则物像落在中间某 50 个元件上。这样，当用电扫描的方法在后 200 个元件上搜索时，可以找出亮度图形与前 50 个元件上的基准像相一致的位置。当扫描到该位置时，即同时求得调焦量，由连动机构移动的物镜即停止在正确调焦的位置上。

采用电扫描方式来代替机械扫描，使可动部件减少，从而提高了测距调焦的可靠性和耐用性。

3. 主动式自动调焦原理　上述这类测距器，因为接受的是外来的光，所以也可称为被动式的。除了这类被动式的测距对焦原理外，有的相机(例如 Canon AF35M)采用发射红外线为照射光源的主动式自动对焦原理。

图 8-33 是一种以红外线为照射源的主动式自动测距调焦原理。由一个圆顶形红外发光二极管射出的红外光束通过一块非球面透镜射出，由于红外发光二极管的指向在左右摆动，光束从最近距离向无限远方向对被摄物进行扫描。另一方面采用硅光电二极管作为红外受光元件，接受从被摄物反射回来的红外光束，并转变为电信号。当接受到的反射光束达到峰值时，电路系统输出一个停止信号，使电磁铁释放停止爪，停止爪迅速嵌入与距离圈啮合的停止齿轮的齿内，使镜头停止在正确对焦的位置上。

这种测距原理同样属三角测量原理，所不同是的用红外发光二极管的转动代替了可动反光镜的转动。

红外线测距系统的主要特点是在任何光照下都能工作，并与被摄物的对比无关，可以在较暗的场合或晚上使用。但被摄物对红外光反射率小，或是一个倾斜的光滑表面使反射光束不能返回照相机时，将使测距系统失灵或对焦不准确。

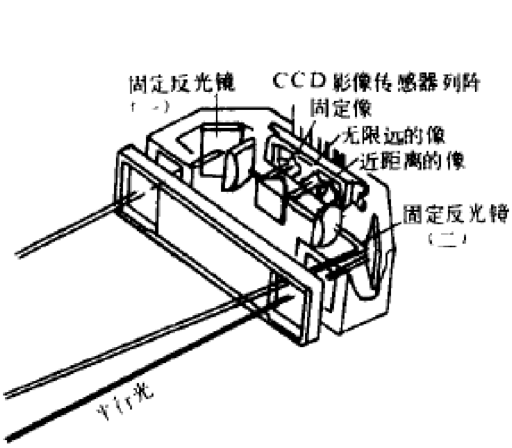


图 8-32　SST 自动调焦部件

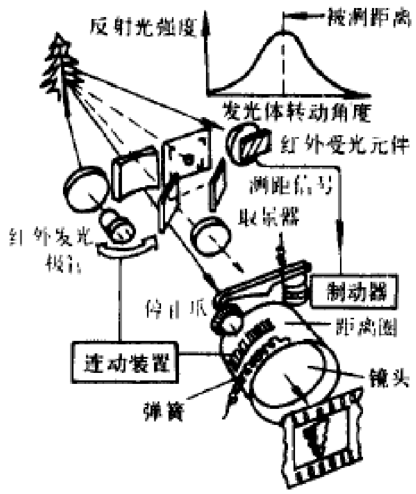


图 8-33　主动式自动调焦原理

二、测速法

测速法自动调焦理论上可以采用电磁波或超声波，但由于技术上的困难，目前实际获得应用的仅有超声波的自动调焦系统（例如 Polaroid 公司的一步相机 Polaroid SX-70 Sonar AF）。它的主要组件是：电子触发器、发射和接收超声波信号的压电型转换器、晶体振荡的计时装置、传感器、累加寄存器和调焦伺服电动机。

图 8-34 为其原理方框图。

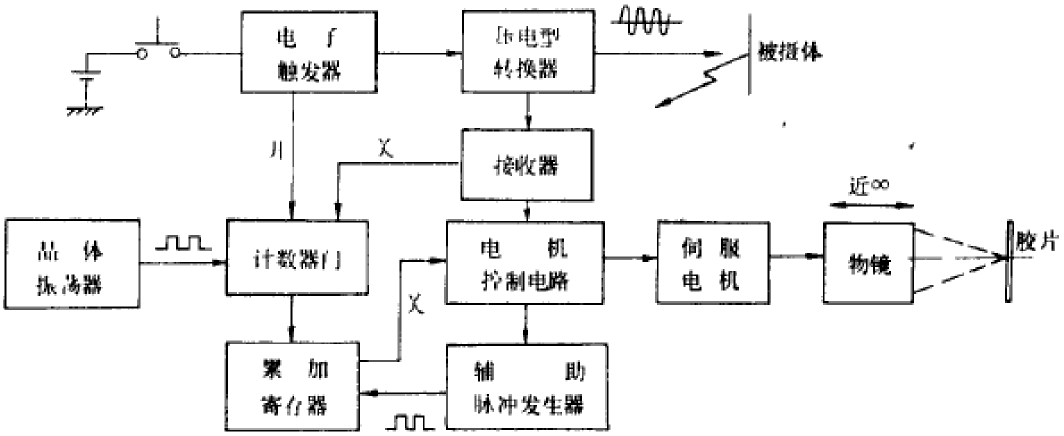


图 8-34　测速法自动调焦系统方框图

当按下快门按钮时，接通电子触发器，经转换器发出一组超声波信号，它由 60kHz、57kHz、53kHz 和 50kHz 四个频率组成。四个频率的超声波信号按一定顺序发出，并且持续时间不一，前两个信号最短，最后一个最长，整个发射过程的持续时间为 1ms。发射不同频率和宽度的超声波脉冲信号，是为了便于在接收时进行鉴别。

在发出信号一开始，计时器同时开始工作，发出间隔固定的时间信号，并送入累加寄存器。寄存器有 128 个顺序状态（七位二进制计数），能按顺序计数，寄存振荡钟所发出的信号个数。

当超声波脉冲信号发出后，转换器立刻转换到接收状态。从转换器发出的超声信号到达被摄体后，被反射后向相机返回。一旦传感器接到上述四个以不同频率和脉冲宽度为特征的信号后，这些信号即作为距离信号送入接收器。从接收器输出的信号作为停止计数的信号送到距离脉冲发生器，距离脉冲使晶体振荡器发出的计时脉冲停止输入累加寄存器。可见，调焦的距离愈远时，距离脉冲的出现就愈迟，寄存器累计的脉冲数就愈多，128 个存储单元中空余的单元

就愈少。

物镜开始时调焦在无限远的位置。当接收器收到返回的超声信号后，伺服电机开始运转，使物镜向调焦于近距离的方向移动。与此同时，一只与调焦机构连动的辅助脉冲发生器发出脉冲，这些脉冲被送入到累加寄存器中。一旦累加寄存器中的脉冲数达到最大寄存值 128 时，立即发出信号使调焦伺服电机停止转动，物镜就被调节在正确的对焦距离上。

超声波自动测距对焦系统的优点是不受光照条件的影响，但对吸收超声波的物体进行测距时就不准确。

关于超声波自动调焦更详细的讨论，可参看参考文献[28]，p114—120。

8-5.2 聚焦检测方式的自动调焦

聚焦检测方式的自动调焦，主要用于单反相机中，它的关键在于如何能够代替人眼去判断聚焦最好的影像是最清晰的。根据所用的原理的不同，它还可以分成对比法和相位法两种。

一、对比法

对比法或称对比度检测法，它检测的是影像的模糊量。

我们知道，当我们观察一个景物的轮廓时，像的轮廓边缘愈清晰，则它的亮度梯度就愈大，或者说是景物边缘处景物和它的背景之间的对比就愈大。反之，离焦的像，它的轮廓边缘模糊不清，亮度梯度或对比就下降。因此，我们可以利用光电元件的非线性特性来检测像的轮廓最清晰的位置。

图 8-35 示早期的一种自动调焦相机(Canon-Auto-Focus)的原理。光电元件用的是 CaS 光敏电阻，它的特性如图 8-36 中所示。

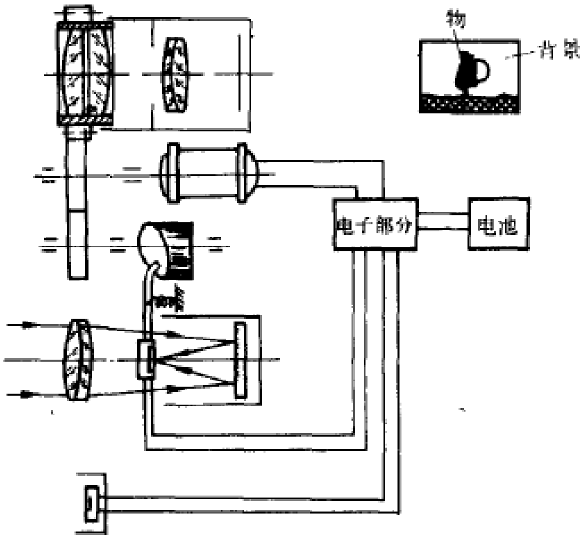


图 8-35 对比法自动调焦原理

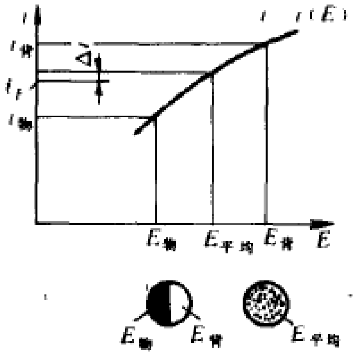


图 8-36 利用光电元件的非线性特性实现自动调焦的原理

设调焦视场内(光电元件上所成的像，见图 8-35 右上方小图中的小圆)景物和背景各占一半。当对焦正确时，光电元件的一半面积接受景物像的照度 $E_{物}$，另一半接受背景像的照度 $E_{背}$，则电路中的电流 $i_F=i_{背}/2+i_{物}/2$。但是当对焦不正确，即景物和背景的像均为模糊时，可以看作光电元件整个面积所接受的是景物像和背景像的平均照度 $E_{平均}=(E_{物}+E_{背})/2$。则电路中的电流 i 应等于 $i(E_{平均})$。由于特性的非线性，由图 8-36 显然可见 $i(E_{平均})>i_F$，即 $i(E_{平均})-i_F=$

Δi。于是调焦电机工作，在移动摄影镜头的同时移动光电元件，直到 $i(E)=i_F$ 为止。图 8-35 下方另一光电元件引入被摄物总的照度水平以控制电路中的放大倍数。

近年提出的对比法自动调焦原理是：将两个各由几十个受光元件组成的检测器放置在与底片等效位置的前后相等距离处（例如图 8-37 所示 Pentax TTL-EFC 系统）。被摄景物的像经分光后同时成在这两个检测器上。检测器的输出形式与它和像面间的离焦大小有关。图 8-38 表示像面与检测器重合时及离焦时，检测器各受光元件接受到的像的照度。

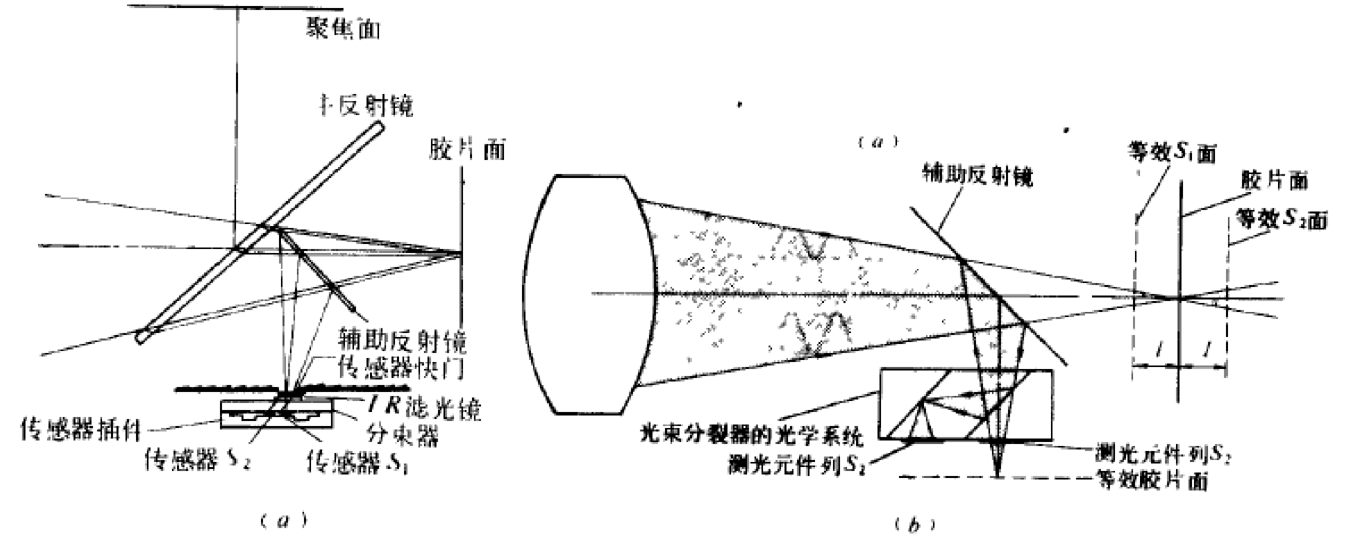


图 8-37 pentax TTL-EFC 系统示意图

当像面与检测器重合时，检测器上所接受的是景物与背景分界边界清晰的像（景物与背景像的照度之差为 C_2），受光元件阵列中部分 $(S_1, S_2, \cdots, S_i)$ 接受景物像的照度，其余部分 $(S_{i+1}, S_{i+2}, \cdots, S_n)$ 则接受背景像的照度。当像面与检测器不重合（即离焦）时，景物像的轮廓模糊，从景物像到背景像的照度如图 (a) 所示，边界附近相邻两个受光元件接受到的照度之差为 C_1，这样受光元件的输出就与重合时不相同。检测器中与景物像的轮廓相对应的两相邻元件所接受照度之间的差，就是景物像的轮廓与背景像之间的梯度或对比。由图可见，当像面与检测器重合时它为最大。既然两个检测器的位置是在底片等效位置前后的相等距离处，因此只有当两个检测器（经电路处理）的输出（代表所测梯度）相等时（即它们对像面的离焦量相等时），调焦的像面刚好与等效底片位置重合，于是调焦完成。

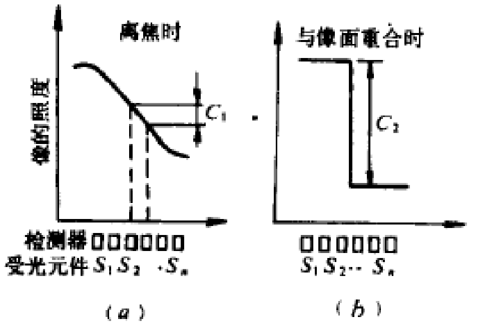


图 8-38 检测器各受光元件接受到的像的照度

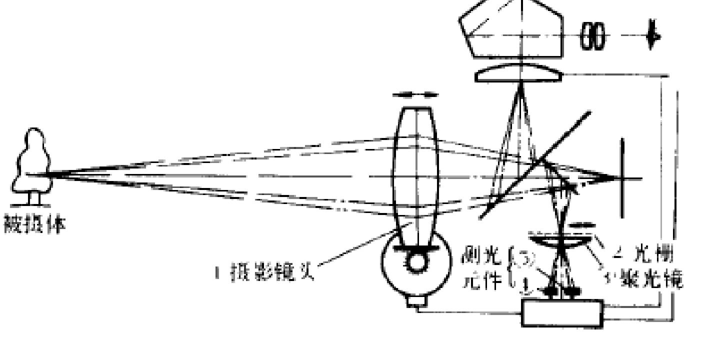


图 8-39 相位法自动调焦原理

二、相位法

相位法或称相位差检测法，它检测的是像的偏移量。

相位法的原理可以用图 8-39 和图 8-40 来说明。在与底片等效的位置放置一由平行线条

组成的网格板，线条相继为透光和不透光的。网格板后适当位置上与光轴成对称地放置二个受光元件。网格板在与光轴垂直方向上往复振动。于是显然可见，当聚焦面与网格板重合时，通过网格板透光线条的光同时到达其后面的二个受光元件。当聚焦面与网格板有离焦时，光束只能先后到达二个受光元件，于是它们的输出信号之间就有了相位差。利用这一相位差经电路处理后即可控制执行机构来调节物镜的位置，同时使聚焦面与网格板的平面重合。

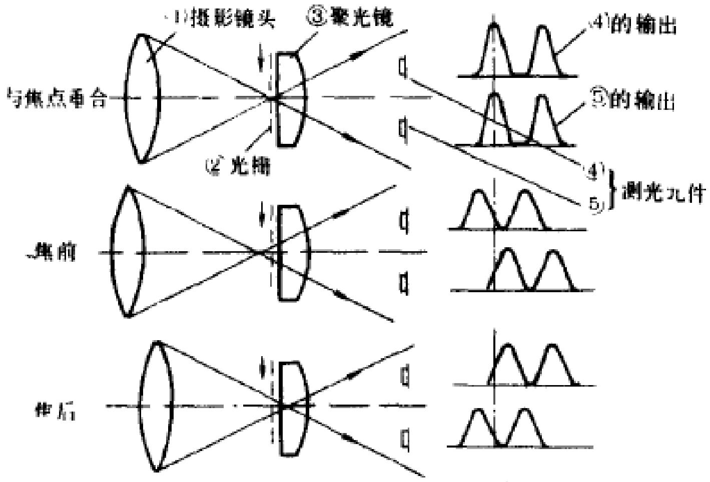


图 8-40 相位法自动调焦的输出

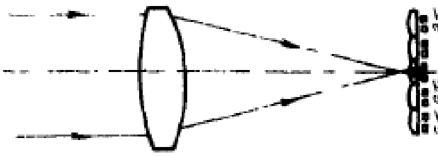


图 8-41 用微透镜阵列代替振动网格板的相位法自动调焦原理

振动的网格板可以用固定不动的微透镜阵列（蝇眼透镜）来代替，每个微透镜的后面各安置了一对受光元件（图 8-41）。这样，微透镜线阵后面便有了二个受光元件的线阵，它们的受光元件是一个一个相间隔地排列着的（图 8-42），受光元件接受景物照度的情形与图 8-38(*a*)的曲线相类似。但是当像的聚焦面不与微透镜阵列重合时，两组受光元件的输出相位上不能重合（图 8-43），只有当像的聚焦面与微透镜阵列重合时，它们之间才没有相位差。于是这一相位差的信号即可用作控制调焦机构的信号。

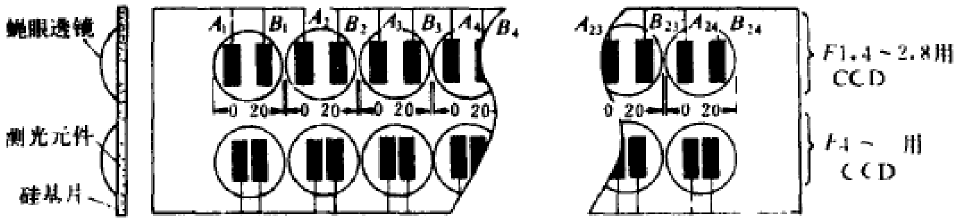


图 8-42 CCD 阵列构造

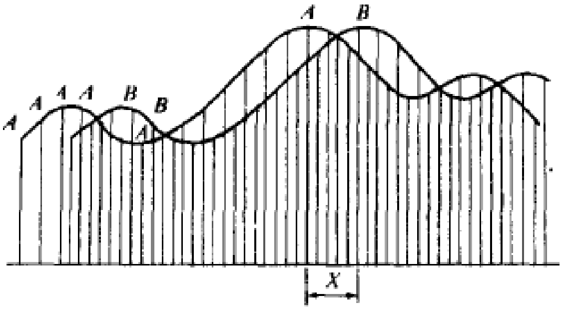


图 8-43 两个 CCD 阵列输出的偏移

第九章　输片系统

在使用胶片作为摄影材料的各种摄影仪器里，通常设有输片机构、展平机构、计片装置和在底片上记录有关摄影信息的记录装置。本章主要讨论它们的结构和工作原理。

§9-1　输片机构

输片机构的作用是，在每一次曝光之后，将已经曝光的胶片卷绕到收片轴上，并从供片轴上退下同量未曝光的胶片。

对输片机构的主要要求有：

(1)在摄影机的每个工作循环之后，输片机构卷过的胶片量都相同，并且胶片在每次曝光后经过像面的输送长度不变，这就是所谓等量输片。如果不能保证等量输片，那末相邻像幅之间的间距就不能保证恒定，或者可能因间距过大而浪费胶片，或者可能因相邻两个像幅互相重叠而损坏影像。如果收片轴在每个工作循环不能保证卷绕等量的胶片，供片轴不能保证退下同量的胶片，或者在从供片轴至收片轴的胶片传输路线上的任何一处，移走的胶片量不等于送来的胶片量，那末胶片就可能在暗盒内发生堆积或拉断的现象。所以等量输片是对输片机构最基本的要求。

(2)保证通过像面的一段胶片在曝光时保持静止或按要求的速度运动。大多数普通摄影机都要求胶片在曝光时保持静止不动，曝光后再由输片机构从像面移走，并输送到收片轴收卷起来。在采用移动底片的方法补偿像移的航空摄影机(见§10-2)里或在光棒式全景摄影机以及缝隙式摄影机(§2-4)里，胶片在曝光时要以一定的速度运动，以消除光学像相对于胶片的运动。

(3)不能损伤胶片，也不应当有静电火花产生。

(4)结构简单，工作可靠，操作方便，容易维护。

输片机构最基本的结构是由供片轴、收片轴和导片辊组成的。如图9-1所示，供片轴上载有未曝光的胶片，收片轴用来收卷已曝光的胶片，导片辊的作用是引导或改变胶片传送的方向和路线。这种简单输片机构只有两个导片辊，它们分布在像面的两端。一般摄影仪器的输片机构至少要有这样两个导片辊来保证胶片通过像面时有正确的位置。

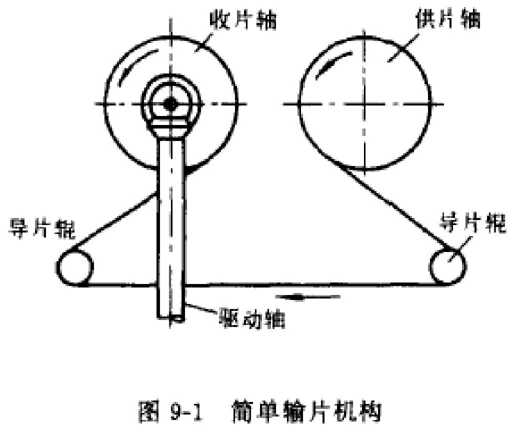


图9-1　简单输片机构

这种简单输片机构的主要缺点是不能依靠收片轴一定的转角来保证等量输片的要求。如果每个工作循环收片轴的转角一定，那末随着收片轴上卷绕的胶片越来越多，卷片轴的直径会越来越粗，收卷的胶片会越来越长，结果造成像幅间距越来越大，胶片浪费严重。例如用轴芯直径为10mm的收片轴收卷厚度为0.15的胶片，若每个工作循环收片轴转3周，胶片在收片轴上的缠绕密度系数为0.93(胶片在收片轴上不可能卷绕得十分紧密，毫无间隙)，那么在拍摄50张像片后，胶片的利用率只有29%，若拍摄200张像片，胶片的利用率将下降为9%。等量输片机

构就是为克服简单输片机构的这个缺点而设计的。

9-1.1 等量输片机构的原理

等量输片机构的原理主要有等量传递和等量卷绕两种。

1.等量传递输片机构 等量传递输片机构的工作原理如图9-2所示。用于输片的主动件是兼作牵引轴的量片轴，在航空摄影机和电动输片小相机中它由电机通过传动链带动旋转，在手动输片小相机中则由板把通过齿轮带动旋转。量片轴牵引胶片有两种方式：一种是通过量片轴上的齿和胶片上齿孔的啮合来输片(图9-4)，另一种是利用量片辊与胶片间的摩擦力来牵引输片(9-9)。前一种多用于小型照相机、电影摄影机和片宽不大的摄影仪器中。在像幅较大的航空摄影机中，为了避免因胶片齿孔强度不高而被拉坏，多采用摩擦输片方式。

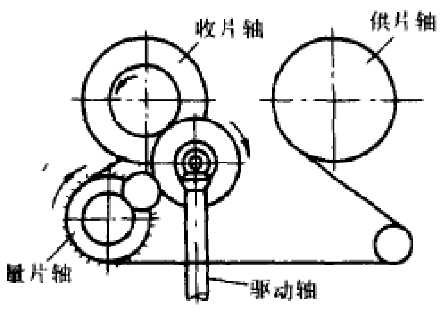


图9-2 等量传递输片机构

在摄影机每个工作循环内，牵引量片轴的转角保持不变，这样就保证每次曝光后胶片在像面上的位移量相同，从供片轴上退下来的胶片长度也相同。因此，在等量传递输片机构中，量片辊既是牵引胶片的主动轴，又是控制输片长度保证等量输片的关键构件。

在供片轴和收片轴上都有摩擦联轴器。供片轴上的摩擦联轴器是为了防止胶片从供片轴上松脱下来，并保持胶片有一定的张力，以利于曝光时的展平。收片轴在卷缠胶片的承片筒和驱动收片轴的传动链之间用摩擦联轴器相连而不是直接刚性连接，是为了在收片辊上卷缠的胶片直径越来越粗时，摩擦联轴器可以打滑，因此尽管由传动链带动的收片轴在摄影机的每个工作循环仍然有固定的转数，收片筒的转角却可以随收片筒上卷缠的胶片直径的增加而减小，结果收片轴收卷的胶片量与量片轴输出的胶片量保持相等。供片轴和收片轴上的摩擦联轴器的摩擦力矩都必须调整，以保持胶片上有足够的张紧力，供片轴和收片轴上的胶片有足够的缠绕密度。

2.等量卷绕输片机构 等量卷绕输片机构是以收片轴作为输片的主动件的，它的工作原理如图9-3所示。驱动轴经齿轮传动，通过离合器带动收片轴旋转，把已曝光的胶片收卷起来。量片轴不再是牵引胶片的主动轴，它由胶片带动旋转，其转角取决于收片轴收片的长度，因此，等量卷绕输片机构里的量片轴仅起测量输片长度的作用。

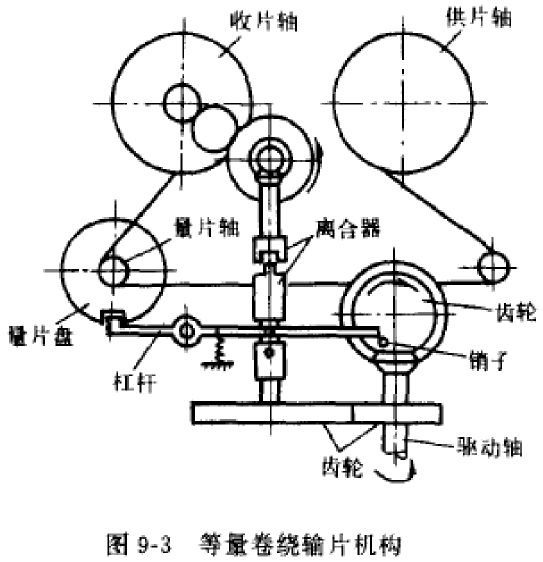


图9-3 等量卷绕输片机构

固定在量片轴上的量片盘通过杠杆控制离合器的脱开和结合。如图所示，当杠杆左端的突起跌入量片盘的凹槽内时，离合器脱开，驱动轴的运动不能传到收片轴上，于是，收片轴停止转动。只有当驱动轴带动的齿轮上的销子转到把杠杆右端顶起的位置时，离合器才重新结合，收片轴开始转动并收卷下一幅已曝光的胶片。这时，杠杆左端的突起已从量片盘的凹槽内退出，因此不会妨碍量片盘的旋转。同时，尽管驱动轴的继续旋转使销子离开了杠杆的右端，量片盘的圆周使杠杆继续保持使离合器结合的位置。因此，收片轴继

续收片，量片轴继续量片，直到量片轴和量片盘旋转一周，杠杆左端突起再跌入凹槽内时，离合器才又脱开并使收片轴停转。

在这种输片机构中，量片辊的直径设计成它的周长恰好等于每曝光一次所需输片的长度，因此，在摄影机的每一个工作循环，量片轴仅旋转一周。由于收片轴收卷胶片的长度完全受量片轴和量片盘的控制，收片轴收片的长度保持一定，不会受收片轴上胶卷直径逐渐增大的影响，所以，这种输片机构称为等量卷绕输片机构，且收片轴上可以不设置摩擦联轴器。

等量卷绕输片机构虽然可以省去收片轴上的摩擦联轴器和对摩擦力矩的调整工作(供片轴上仍然要有摩擦联轴器)，但必须在驱动收片轴的传动链中设置离合器和控制离合器的机构，这在一定程度上增加了结构的复杂程度。尤其是这种输片机构的收片轴只能间歇工作，如果载片量较大，供片轴和收片轴的启动和制动会产生较大的过载和冲击，对胶片和机构的工作可靠性和寿命不利。因此，大多数摄影仪器采用等量传递输片机构。

9-1.2 输片机构的类型和结构

等量传递输片机构按供片轴和收片轴的运动方式可分为间歇输片机构和连续输片机构两类。在输片量很大的连续输片机构中，还有能够自动调节重心位置的自动平衡输片机构。

一、间歇输片机构

间歇输片机构的收片轴和供片轴只在输片时转动，完成输片后停止转动。

1. 小型照相机的间歇输片机构 图 9-4 为使用 35mm 胶片的 135 照相机广泛采用的手动输片机构。卷片时，逆时针板动卷片板把 1，通过齿轮传动，使卷片芯轴 6 和收片筒 12 旋转，收卷已曝光的胶片；同时也使量片轴 11 和输片轮 13 旋转。输片轮以它两端的齿和胶片两边的齿孔啮合来牵引胶片并进行等量输片。输片轮的齿数一般为 8，俗称八牙轮，它的周节与胶片上齿孔的节距($t=4.75$mm)相等。因此，八牙轮每转一周拉过的片长为

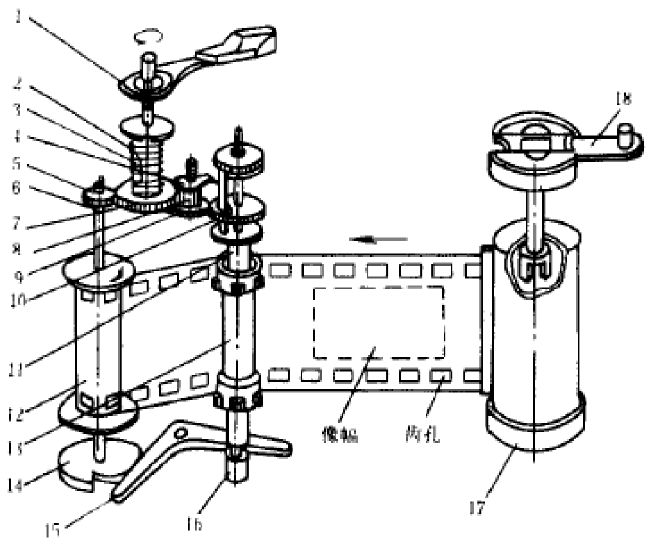


图 9-4 小型照相机的手动输片机构

$$L = 8t = 8 \times 4.75 = 38\text{mm}$$

正好是 $24 \times 36\text{mm}^2$ 有效像幅的纵向长度($l_x=36$mm)加上像幅间距($e=2$mm)。也有的 135 照相机用六牙轮或四牙轮，它们的输片长度分别为 28.5mm 和 19mm，对应像幅尺寸和间距分别为 $24 \times 27\text{mm}^2$，$e=1.5$mm 和 $24 \times 18\text{mm}^2$，$e=1$mm。

为了使收片筒的收片长度与输片轮的输片长度一致，卷片芯轴与收片筒之间通过摩擦机构相连(图 9-5)。当收片筒上的胶片直径增大时，固定在卷片芯轴上的芯套与摩擦垫片以及与收片筒固定在一起的内筒之间可以打滑，使收片筒的转角小于卷片芯轴的转角。增减摩擦垫片的厚度或数目，可以调节压簧的压力，获得适当的摩擦力矩。

在卷片中途或卷完一张片子后，只要一松手，卷片板把就会在复位簧 2 的回复力矩作用下

反转复位。但是，在板把轴筒内的单向簧 3 是一种内径略小于轴径的扭簧。当板把轴逆时针转动时，利用轴与扭簧之间的摩擦力把扭簧旋紧，结果使扭簧与轴之间的摩擦力增大，板把轴的动力就可以传给大齿轮 7，并通过大齿轮使量片轴和收片轴工作；当板把轴反转时，使单向簧放松，轴与簧之间的摩擦力减小，以致轴在簧中打滑，板把轴的复位不会带动大齿轮反转。同时，在小齿轮 8 的轴上空套着一个单向爪 4，当卷片板把反转时，依靠小齿轮端面与单向爪之间的摩擦力，使单向爪随小齿轮反转并卡入大齿轮 7 与小齿轮 8 的齿间，把齿轮传动链锁死。因此，不论在什么时候松开卷片板把，量片轴和收片筒都不会倒转，输片轮已经拉过来的胶片不会倒退回去，收片筒上的胶片不会松退下来。

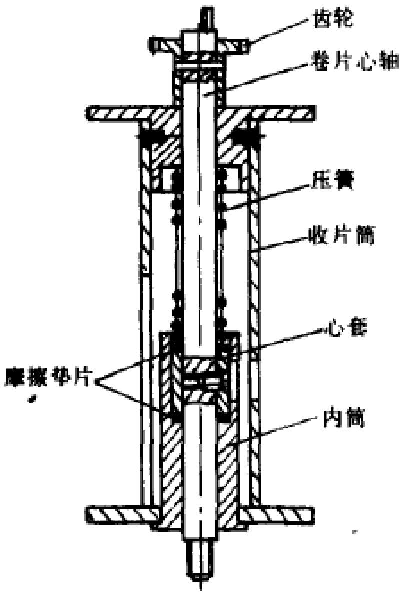


图 9-5 收片筒内摩擦机构

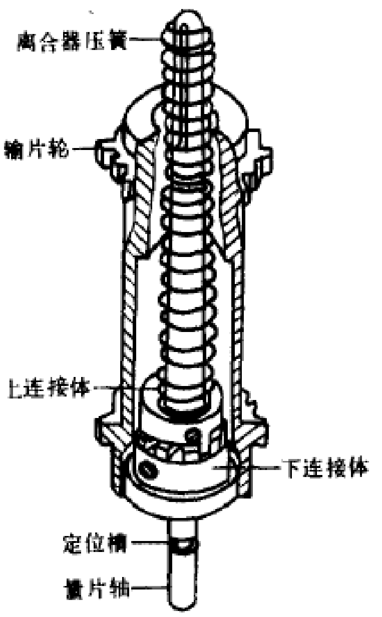


图 9-6 输片轮内离合器

大多数小型照相机的输片系统里还设有倒片机构。当整卷胶卷拍摄完后，可以转动倒片手柄 18，使供片轴反向转动，把胶片从收片筒退下来，倒回到胶卷盒 17 里去。为了在倒片时使输片轮与传动链脱开，在倒片之前先揿压相机底部的倒片揿钮 16，它实际上就是量片轴 11 的下端。如图 9-6 所示，量片轴上升的结果，使固定在量片轴上的离合器上连接体与固定在输片轮上的下连接体脱离啮合，输片轮就可以在量片轴上自由转动，不会妨碍倒片的顺利进行了。当装上新的胶卷重新开始输片时，卷片芯轴下端的凸轮 14(图 9-4)使杠杆 15 的右臂从倒片揿钮 16 的定位槽退出，量片轴在离合器压簧(图 9-6)的作用下自动复位，离合器恢复啮合状态，量片轴带动输片轮正常输片。

在很长时期内，小型照相机实现自动输片的主要障碍是缺乏理想的微型动力源。蜗形弹簧(发条)能够在较小的体积内储藏较多的机械能，所以在一些半自动卷片照相机里被用来作为输片机构的动力。发条上紧后，只要揿下快门按钮，输片机构就会在快门释放后自行启动，输完一张片幅后又自动停止。这样就避免了每次卷片都要板一次卷片板把的动作。然而，发条的力矩在工作过程中不能保持恒定，而要随它的工作转角的增大而下降，它的最大力矩又受到输片机构机械强度的限制。因此，这种输片机构容易在输片的末尾由于发条的推力不足而出现故障。

随着微型电机体积的缩小和集成电路集成度的提高，小型照相机终于实现了全自动输片，即只要按下快门揿钮，微型电机就会自动启动，推动输片机构进行输片动作，输完一张片幅后又自动停止工作。当全部胶卷拍摄完后，拨动倒片钮，电机就会反转，把已曝光的胶卷全部倒回

胶卷盒里去。

图 9-7 所示为一种小型相机的自动卷片机构。微型电机 1 启动后，它轴上的齿轮 2 通过一系列齿轮的传动，使齿轮 3 和 4 转动，并在这里分两路继续传动。一路经齿轮 3 和 5 驱动输片轮 6 旋转输片，另一路经齿轮 4、7 和摩擦联轴器 8 使电机的外壳 9(也是收片辊)转动，收卷已曝光的胶片。凸轮 10 每转一周转换一次触点开关 11，使输片电机在输完一张片幅后停止转动。

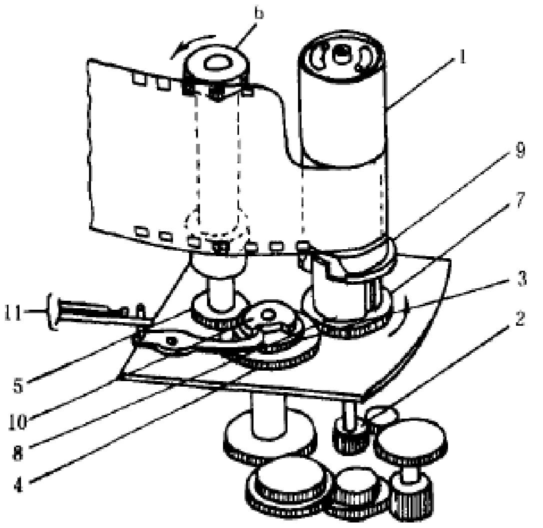


图 9-7 小型相机的自动卷片机构

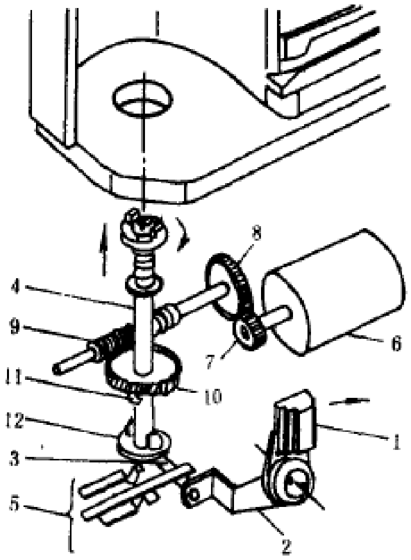


图 9-8 小型照相机的自动倒片机构

图 9-8 是另一种小型相机里的自动倒片机构。倒片前，也要先使输片轮与输片机构的传动链脱开。然后，顺时针方向板下倒片按钮 1。与倒片钮固定在一起的杠杆 2 上的销子 3 把倒片轴 4 向上顶起，使它上端的接合爪与供片轴下端的接合爪(图上未表示)啮合。同时，销子 3 转换触点开关 5，使卷片电机 6 反转。卷片电机通过齿轮 7、8、蜗杆 9、蜗轮 10、蜗轮爪 11 和凸爪 12，带动倒片轴 4 旋转，把已曝光的胶片从收片辊上退下来，倒回到供片轴上的胶卷盒里去。

2. 航空摄影机的间歇输片机构 间歇输片机构虽然有在周期性启动和制动时产生过载和振动的缺点，但是结构比较简单，而且在停歇期间不消耗动力。因此，载片量不很大的中、小

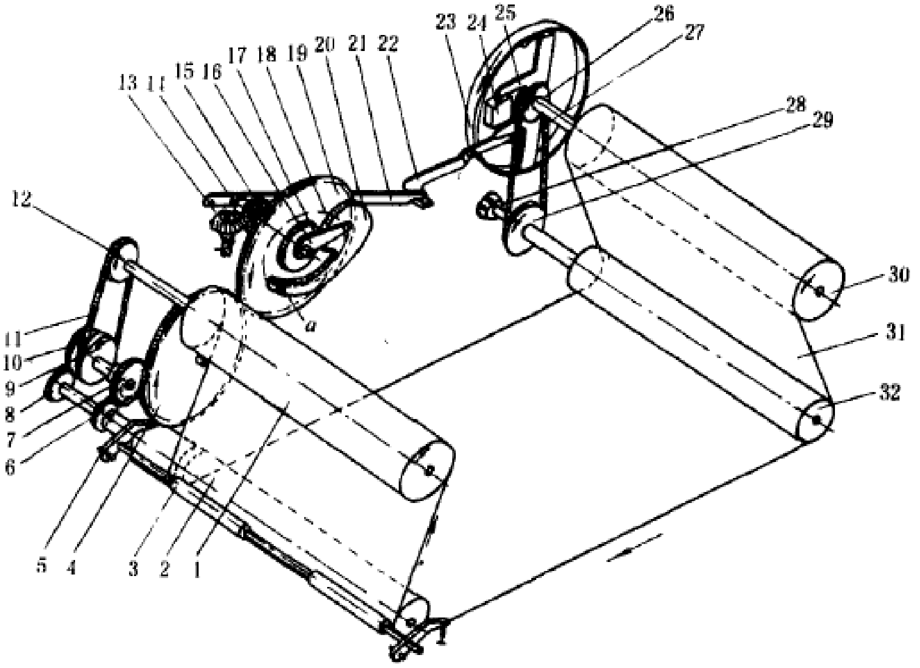


图 9-9 分幅航空摄影机的间歇输片机构

型航空摄影机往往采用这种输片机构。

图 9-9 所示为一种分幅航空摄影机的间歇输片机构。它的载片量为宽 240mm、厚 0.06mm 的薄片基胶片 240m。来自分配机构的动力通过锥齿轮 13 和 15 带动间歇机构运动。间歇机构由转臂 16、摇臂 20、曲线导槽 18(图中用点划线简化表示导槽的中心线)、小齿轮 17 和大齿轮 19 组成。摇臂 20 由固定在锥齿轮 15 的轴上的转臂 16 带动运动,一方面绕锥齿轮轴旋转(公转),另一方面绕它本身的轴转动(自转)。摇臂朝向小齿轮的一面有一段齿弧与小齿轮啮合,因此,当它绕锥齿轮轴公转时,带动空套在锥齿轮轴上的小齿轮和与小齿轮固定在一起的大齿轮一起旋转;与此同时,摇臂端部的滚子 a 在曲线导槽中滑动,并受导槽曲线的控制使摇臂只能绕自身轴在一定的范围内摆动,这种附加在公转上的摆动使输入轴(锥齿轮轴和转臂)与输出轴(小齿轮和大齿轮)之间的传动比发生变化。恰当地设计导槽的曲线,可以使这种变速比的行星轮系的传动比按图 9-10 所示的规律变化。图中横坐标 θ 为输入轴的转角,它在摄影机的每个工作循环旋转一周。

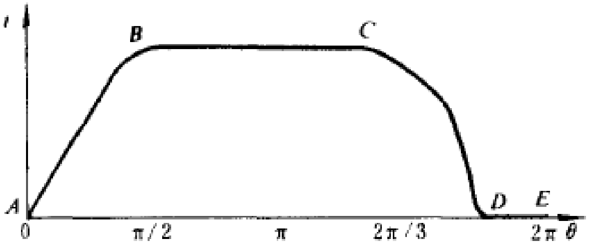


图 9-10 间歇机构的传动比曲线

由图可见,传动比 i 先随 θ 的增加而逐渐增大,接着保持一段恒定的值,然后逐渐减小,最后减小到零,并在零值保持一段时间。这就是说,锥齿轮的连续运动经过这样的间歇机构变为大齿轮的间歇运动,再通过齿轮 4、7 和 6,带动量片辊 2 作同样的间歇运动。在传动比曲线(图 9-10)的 $ABCD$ 部分,量片辊进行输片运动;在 DE 段,量片辊停止转动,以便展平机构有足够的时间展平胶片。

由于航空摄影机的载片量一般很大(从几十米到几千米胶片),所以多数采用摩擦输片方式。为了增大量片辊与胶片之间的摩擦力,量片辊的金属辊芯外面包覆一薄层橡胶,并且在量片辊的侧面设置压片辊 3,在两端用杠杆 5 和弹簧保持对胶片的适当压力。

量片辊在等量输片的同时,还通过固定在它轴上的齿轮 8 和 10,弹簧带轮 9,绕性弹簧带 11,带动弹簧带轮 12 和收片筒 1 旋转,收卷量片辊送来的已曝光胶片。当收片筒上的收片量超过量片辊的输片量时,弹簧带和弹簧带轮之间产生打滑,使收片筒的转角小于量片辊的转角,并且随收片筒上胶卷的直径的增大而逐渐减小,从而保持收片筒的收片量与量片辊的输片量相等。

供片轴 30 上的摩擦机构由摩擦轮 23 和摩擦片 25 组成。摩擦轮与供片轴一起旋转,摩擦片则空套在轴上。摩擦片加在摩擦轮端面上的摩擦力,一方面防止供片筒上胶卷自行松退下来,另一方面使摩擦片随摩擦轮逆时针转动,它的一条水平臂的端部把工作循环指示开关 24 的撤钮压下,使开关接通。由于锥齿轮 15 的轴端有一个偏心轴头 14,它在每一个工作循环拨动一次杠杆 21,使杠杆 21 的右端往下压杠杆 22 的左端,杠杆 22 的右端则使摩擦片 25 顺时针转动把开关 24 断开。开关每断开一次,操纵器面板上的指示灯就闪烁一次,向驾驶员指示出输片机构处于正常工作的状态。同时,供片轴还通过弹簧带轮 26、弹簧带 27,带动弹簧带轮 29 和信号轮 28 旋转,使维修员可以从暗盒外面检查输片工作是否正常。如果指示灯和信号轮都停止工作,就说明输片机构出了故障或胶片已用完。

在供片轴上和收片轴上使用的摩擦机构,除前面已介绍的几种结构外,在航空摄影机里还广泛采用以下两种结构型式,它们的主要区别是摩擦力矩在摄影时固定不变或可以自动调节。

图 9-11 所示为常用的固定摩擦力矩的摩擦联轴器,其中(a)用于收片轴,(b)用于供片轴。

如图(a)所示,在半轴6上空套着拨盘9、传动齿轮4、摩擦盘8和摩擦片2(一般用胶木或毛粘圈制成)。压簧7在摩擦盘上施加一定的正压力,使摩擦片与摩擦盘和拨盘之间产生一定的摩擦力矩。这样,一方面传动齿轮靠摩擦力带动拨盘,并通过拨盘上的拨销带动收片辊1收卷胶片。摩擦力矩的大小可以通过调整螺母5改变压簧7的压力来调节,但只能在装配时和维修时调整,在摄影机工作过程中不能改变。图(b)所示的摩擦联轴器因为用于供片轴,所以结构比较简单。它的摩擦盘3固定不动,供片辊(图上未表示)被胶片拉动旋转时,通过拨盘5上的拨销带动拨盘在半轴6上转动。摩擦盘和摩擦片4对拨盘的摩擦力矩可以用增减垫片2的方法改变压簧7的压力来调节。

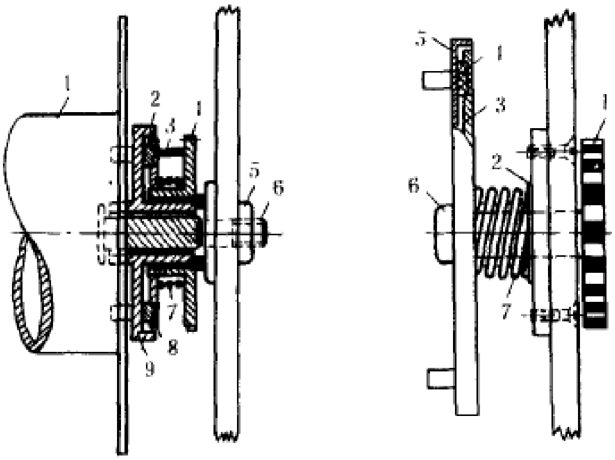


图 9-11 固定摩擦力矩的摩擦联轴器

这种摩擦力矩在摄影时不能改变的摩擦联轴器,在胶片上产生的拉力随供片辊或收片辊上卷缠的胶卷直径而变化,并与胶卷直径成反比。这是它的主要缺点。尤其当载片量较大时,供片辊和收片辊上的胶卷直径在摄影过程的始末变化较大,胶片张力的变化范围也较大。若张力过小,会影响曝光时的展平质量和胶卷在供片辊和收片辊上的缠绕密度;张力过大,会使胶片产生较大的变形,在弹性伸长变形的情况下曝光的影像,变形恢复后几何尺寸和形状将发生变化,胶片的张力如果超过片基的机械强度极限,还可能把胶片拉断。所以,在某些载片量很大的航空摄影机中,采用如图9-12所示的摩擦力矩可变的电磁摩擦联轴器。这种电磁摩擦联轴器也叫做磁粉离合器。当绕组1中通以一定大小的电流时,盒内的磁粉2被磁化并包紧在片轴3上,对片轴的转动产生一定的阻力。阻力的大小可以由控制绕组中电流的大小来调节。因此,可以设计适当的电路随片辊上胶卷直径的变化在摄影过程中自动调节阻力矩的大小,保持胶片的张力不变。

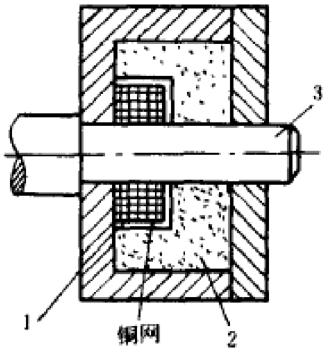


图 9-12 电磁摩擦联轴器

图9-13所示为一种光棒式全景航空摄影机[60]的间歇输片系统示意图。这种全景航空摄影机能装载宽127mm、厚0.06mm的薄片基胶片610m。为了减小沉重的收片筒和供片筒在每个工作循环启动和停止时的过载冲击和振动,这种输片机构在胶片的传输路线上采用不同的速度和加速度。如图9-14所示,输片链轮由输片电机带动以较低的加速度启动和制动,并在达到稳定运转时以较慢的速度输片。输片链轮是这种输片机构牵引胶片的主动轮,它包括在供片端的供片链轮和在收片端的收片链轮(图9-13)。电机启动后,供片链轮把未曝光的胶片从供片端的胶卷盒内拉出来,输送到焦面上去;收片链轮则把已曝光的胶片输送到收片端的胶卷盒内贮存起来。供片端和收片端的胶卷盒具有相同的结构,可在相机本体上快速装卸。胶卷盒支承载片筒的半轴上设有摩擦机构,其作用已如前述。

由于光棒式全景摄影机的圆柱形焦面的半径小于物镜的焦距,所以在扫描摄影时,光学影像在与快门狭缝运动的相反方向上沿焦面运动,为消除胶片与影像之间的相对运动,胶片也必须与光学影像同步运动。如图9-13所示,胶片的运动是由以恒定速度旋转的胶片轮来带动的。

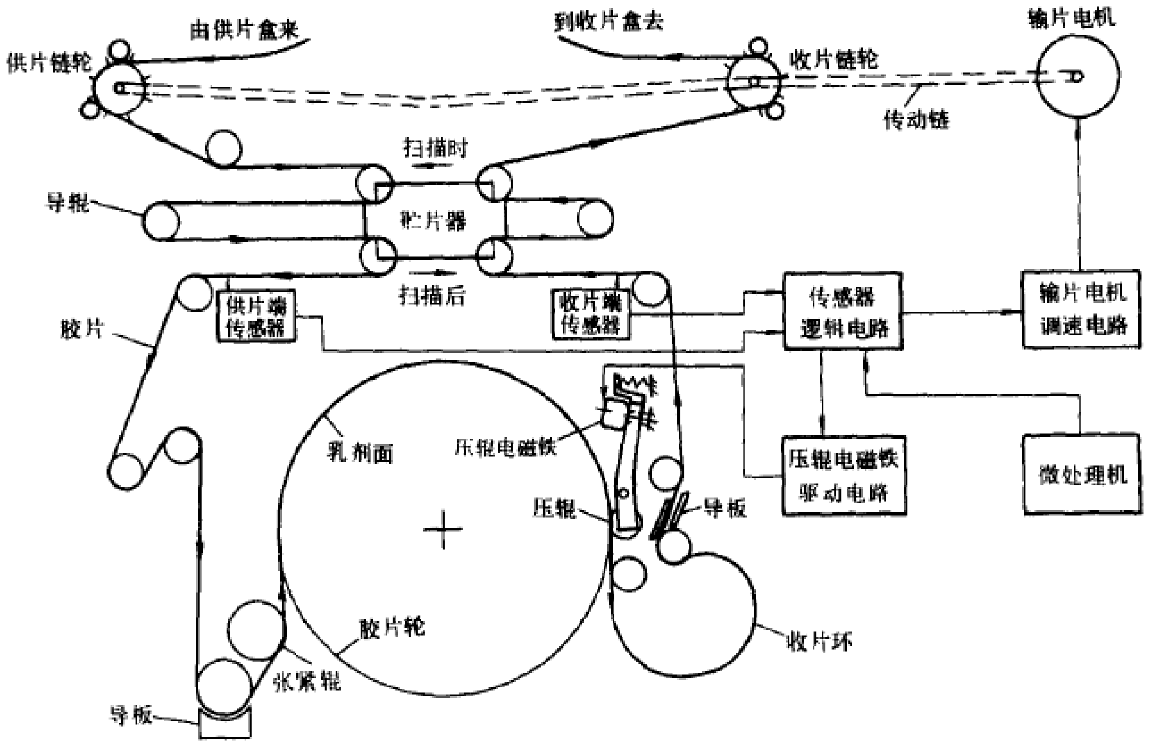


图 9-13　光棒式全景航空摄影机的间歇输片系统

当压辊压下时，胶片在压辊和张紧辊的联合作用下紧贴在胶片轮的圆柱面上。胶片轮不仅靠摩擦力带动胶片以准确的速度沿焦面运动，接受扫描曝光，而且给胶片的乳剂面提供精确的展平基准。如图 9-14 所示，胶片在焦面上的运动速度大约是输片链轮输片速度的二倍。扫描曝光结束时，胶片轮恰好把一幅已曝光的全景像片移出了焦面，并更换了一幅未曝光的胶片置于焦面上，因此，控制电路把压辊电磁铁断电，压辊抬起，胶片不再紧贴在胶片轮上，虽然胶片轮仍在以恒速旋转，却不能带动胶片运动了。胶片在压辊抬起的瞬间停止运动，等待接受下一幅全景像片的扫描曝光。由图 9-14 可见，胶片在焦面上高速运动的持续时间仅为输片链轮输片时间的四分之一。

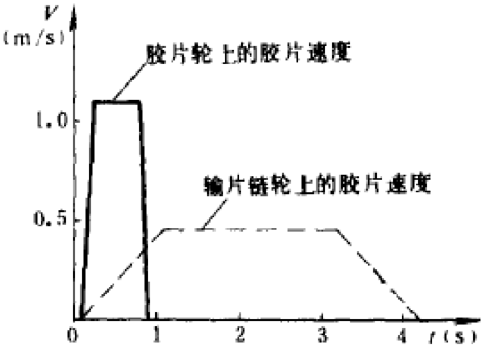


图 9-14　胶片传输速度图

储片器在胶片轮和输片链轮之间起缓冲和调节胶片的输片速度和输片量的作用。扫描曝光期间，储片器从收片端向供片端移动，把它左端的胶片放出来，补充低速转动的供片链轮供片的不足，满足胶片轮高速拉片的需要，同时把胶片轮送出来的已曝光的胶片暂时储存在它的右端，以免低速转动的收片链轮来不及收片。在扫描曝光后，由于胶片停止运动，而输片链轮还在继续转动，结果由胶片把储片器从供片端拉回到收片端。于是，收片链轮把储片器暂存的已曝光胶片输送给收片端的胶卷盒收卷起来，同时，供片链轮从供片端的胶卷盒中拉出来的未曝光胶片又暂时储存在储片器的左端，供下一个工作循环时胶片轮拉片所用。在压辊和导板下面留有一段松弛的胶片，称为收片环，也是在两种高低不同的输片速度之间起缓冲和调节作用的。因为由图 9-14 可以看出，在每个工作循环开始时，胶片在压辊压下的瞬间被胶片轮带动以高速运动，而这时电机刚刚启动，收片链轮速度还很低，由胶片轮输出的一部分胶片要由收片环来吸收。随着收片链轮和供片链轮的逐渐加速以及储片器向供片端的运动，收片环再把它暂存的胶片逐渐放出。当输片链轮达到稳速运转时，收片环吸收的胶片量与它放出的胶片量达到

动平衡。

输片系统各部分机构的启动和停止，工作程序的协调和运转速度的调节是由相机的微处理机通过输片控制电路来操纵的。图 9-15 是输片系统控制电路的原理图。如图所示，控制电路由输片电机调速电路、储片器位置传感器、传感器逻辑电路、输片电机断路比较器电路和压辊电磁铁驱动电路等部分组成。

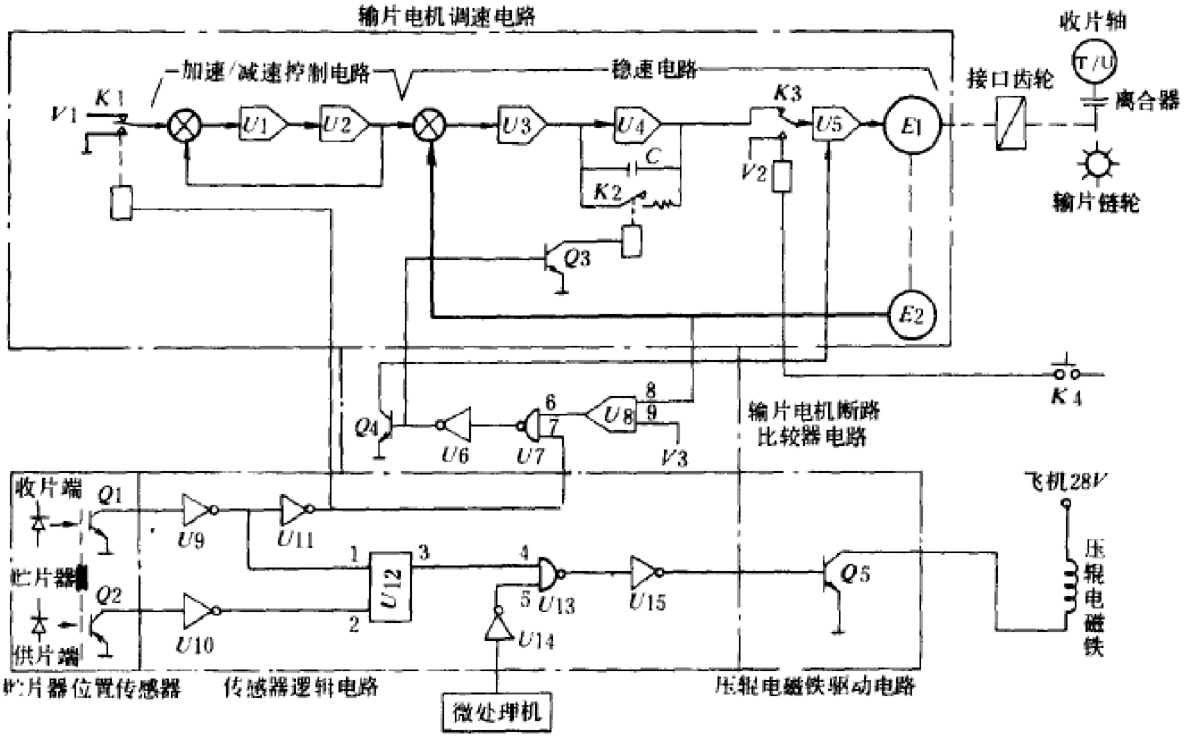


图 9-15　输片系统控制电路原理图

(1)输片电机调速电路。输片电机调速电路包括加速/减速控制电路和稳速电路两部分。这两部分电路前后串连，前一个的输出就是后一个的输入。

加速/减速控制电路的输入端有一个固体开关 K_1，它受储片器位置传感器的控制切换输入信号。在需要启动输片电机工作时，开关将一个固定的参考电压 V_1 接通；当要停止电机工作时，开关接地。因此，输入信号不是一个固定的电压就是等于零，而且在开关切换时是突变的阶跃信号。把这样的信号直接加到后面的稳速电路输入端，对电路的工作和稳速精度都不利。加速/减速控制电路利用负反馈可以把突变的阶跃信号转变为逐渐增大或逐渐减小的渐变信号加到后面的稳速电路上，使输片电机在启动和停止时的加速度大大减小。

稳速电路主要包括加法放大器 $U3$、积分器 $U4$、功率放大器 $U5$、输片电机 $E1$ 和测速电机 $E2$。测速电机把比例于输片电机转速的电信号反馈到加法放大器的输入端，与加速/减速控制电路的输出信号相减。加法放大器把它们的误差信号放大，然后通过积分器和功率放大器调节电机的转速。在启动时，稳速电路跟随输入信号的逐渐增大而使电机的转速逐渐增加。当输入信号稳定在固定的参考电平上，稳速电路也把电机的转速稳定在一定的水平上。这时，如果负载力矩或其他因素引起电机转速发生变化，测速电机马上把反映这种变化的电信号反馈到输入端，加法放大器立刻把恒速控制信号与反馈信号比较，将其误差信号放大后加到电机两端，使电机的转速迅速稳定在给定的工作转速上。积分器的作用是进一步提高稳速电路的精度，改善系统的品质。如果需要使输片电机停止工作，稳速电路会跟随输入信号逐渐减小而使电机的转速逐渐降低，直至完全停止。

在功率放大器的输入端有一个转接开关 $K3$，在需要手动输片时，可以按压暗盒上的手动

进片开关 $K4$，使开关 $K3$ 动作，把功率放大器的输入端转接到一个固定的参考电平 $V2$ 上，而与积分器 $U4$ 的输出断开。这时输片电机就会由功率放大器直接驱动旋转，带动输片链轮输片。当不需要手动输片时，只要停止按压手动进片开关 $K4$，开关 $K3$ 会跳回原来的位置，把积分器的输出信号重新与功率放大器的输入端接通。

(2)储片器位置传感器。储片器位置传感器实际上是光电转换电路。在储片器运动的供片端和收片端各有一个光电耦合放大器 $Q1$ 和 $Q2$。当储片器位于这两端时，恰好遮断光线，使光电管的输出呈高电位；当储片器离开这两端时，光电管受光导通，输出置成低电位。储片器位置传感器就是这样通过它输出电平的变化来反映储片器位置变化的。

(3)传感器逻辑电路。传感器逻辑电路是由"非"门 $U9$、$U10$、$U11$、$U14$ 和"与非"门 $U13$ 等门电路以及锁存器 $U12$ 等组成。它根据微处理机的指令和储片器位置传感器的信号控制输片系统的工作程序，例如，输片电机何时启动，何时停止；压辊电磁铁何时通电，何时断电等。

(4)输片电机断路比较器电路。输片电机断路比较器电路由比较放大器 $U8$、"与非"门 $U7$、"非"门 $U6$ 和三极管 $Q4$ 组成。该电路把测速电机 $E2$ 的输出电压与一个固定的参考电压 $V3$ 进行比较，并根据传感器逻辑电路的指令，在需要使输片电机停止工作时输出一个钳制信号使功率放大器 $U5$ 停止工作，同时还输出一个信号通过三极管 $Q3$ 接通积分器 $U4$ 的放电回路把积分电容 C 上的电荷放掉，以免影响下一个工作循环的工作。在一个新的工作循环开始时，又根据传感器逻辑电路的指令解除对功率放大器的钳制和切断积分器的放电回路，使稳速电路能正常工作。

(5)压辊电磁铁驱动电路。压辊电磁铁驱动电路通过三极管功率放大器 $Q5$，根据传感器逻辑电路的控制信号控制压辊电磁铁的通断，从而控制压辊的抬起或压下。

控制电路的工作程序如下：

当相机进入扫描照相阶段时，微处理机向输片系统的控制电路发出一个低电平的"压辊压下"指令。该指令通过"非"门 $U14$ 将一个高电平信号加到"与非"门 $U13$ 的输入端 5，使"与非"门 $U13$ 翻转。低电平的"压辊压下"指令即通过"与非"门和"非"门加到压辊电磁铁驱动电路三极管 $Q5$ 的基极上，使三极管导通。压辊把胶片压紧在旋转的胶片轮上，胶片轮即带动胶片沿圆柱形焦面运动，接受扫描曝光。

胶片轮在拉动胶片接受曝光的同时，也通过胶片拉动储片器，使储片器离开收片端向供片端运动。储片器一离开收片端，收片端传感器的光电管 $Q1$ 立刻受光导通，其输出随即置成低电位。该信号通过传感器逻辑电路的两个"非"门 $U9$ 和 $U11$ 同时加到加速/减速控制电路输入端的开关 $K1$ 和输片电机断路比较器电路的"与非"门 $U7$ 上。

收片端传感器通过两个"非"门 $U9$ 和 $U11$ 送给"与非"门 $U7$ 的输入端 7 的低电位信号，使 $U7$ 的输出翻转成高电位。该高电位信号通过"非"门 $U6$ 变成低电位信号同时加到三极管 $Q3$ 和 $Q4$ 的基极上，使它们截止。$Q3$ 截止的结果使 $K2$ 把积分器 $U4$ 的放电回路断开，从而使积分器能够接受加法放大器 $U3$ 输出的信号正常工作；$Q4$ 截止的结果输出一个高电位信号加到功率放大器 $U5$ 上，解除对功率放大器的钳制，使功率放大器能接受积分器 $U4$ 的信号正常工作。

与此同时，送给加速/减速控制电路的低电位信号通过开关 $K1$ 把输入端切换到固定参考电压 $V1$。加速/减速控制电路把这个突变的阶跃信号变换成渐变的递增信号加到后面的稳速电路加法放大器 $U3$ 的输入端，再通过积分器 $U4$ 和功率放大器 $U5$ 使输片电机启动并逐渐加速。当加速控制电路的输出达到与它输入端的固定参考电压 $V1$ 相应的最大值，并稳定在该值

不变时，稳速电路就使输片电机在一定的转速下稳定地运转。被输片电机驱动的输片链轮也就从静止开始加速到一个稳定的速度。也就是说，供片链轮开始以一个稳定的速度把未曝光的胶片从供片盒里拉出来输送给暗盒里的储片器和胶片轮，收片链轮也开始以稳定的速度把已曝光的胶片送往收片盒收卷起来。

由于锁存器 $U12$ 有锁存信号的功能，所以虽然收片端传感器的输出信号由于储片器离开收片端而翻转成低电位，并且通过“非”门 $U9$ 使锁存器输入端 1 的输入信号翻转成高电位，但是锁存器输出端 3 输出的信号仍然保持原来的高电位不变。同时，微机的“压辊压下”指令在照相阶段始终有效，因此在照相阶段内，压辊电磁铁始终有电，压辊始终压下，胶片在胶片轮带动下始终以给定的速度运动。

当照相阶段结束时，胶片轮恰好拉完一幅片长，这时输片电机已开始输片，储片器还未运动到供片端，微机的“压辊压下”指令已经结束，$U14$ 的输入变成高电位，该高电位信号经过“非”门 $U14$ 变成低电位使“与非”门 $U13$ 翻转。$U13$ 的输出变为高电位，经过“非”门 $U15$ 使压辊电磁铁驱动电路的三极管截止，压辊电磁铁线圈断电，把压辊抬起。这时，虽然胶片轮仍继续转动，但由于胶片不再贴紧在胶片轮上，所以胶片轮不再带动胶片运动，焦面上的胶片处于静止状态。

然而只要储片器不在收片端，收片端传感器的光电管 $Q1$ 的输出就保持低电位不变，输片电机就继续转动，输片链轮也就继续转动。供片链轮继续供片和收片链轮继续收片的结果使储片器又返回收片端。

当储片器一回到收片端，就把收片端传感器的光线遮断，使光电管 $Q1$ 的输出信号翻转为高电位。该信号通过逻辑电路使加速/减速控制电路的输入端接地，加速/减速控制电路的输出信号开始减小，它使输片电机开始减速。与此同时，收片端传感器的信号通过输片电机断路比较器电路使积分器 $U4$ 的积分电容 C 放电，并在电机转速接近零时钳制功率放大器，从而使输片电机停止工作。输片系统至此又回到等待状态，直到微处理机发出下一个“压辊压下”指令时再开始下一个工作循环。

供片端传感器还有检测输片有无故障的作用。当输片发生故障，储片器经过三个工作循环仍然停在供片端不动，微处理机就会向故障监控电路发出工作故障指令，把座舱控制盒上的胶片故障指示灯点亮，同时使摄影机停止工作。

二、连续输片机构

连续输片机构的收片轴和供片轴在摄影机工作期间，不像间歇输片机构那样周期地启动和停止，而是连续不断地转动。这样可以消除启动和制动时的过载、冲击和振动及其对摄影质量和机构的损害，因此像幅尺寸和载片量都较大的航空摄影机往往采用这种连续输片机构。在这类输片机构里，供片轴连续不断地退下胶片，收片轴连续不断地收卷胶片，然而在焦面处，胶片可能有连续运动和间歇运动两种情况。

图 9-16 所示为一种缝隙航空摄影机的输片机构。根据缝隙摄影的原理，胶片必须在飞行方向上以一定的速度连续不断地沿焦平面移动。因此，整个输片机构可以连续运转，胶片在从供片轴到收片轴的全部传输路径上具有相同的运动速度。当飞行的速高比发生改变时，可通过调节输片电机的转速，改变牵引胶片的主动件——量片辊的转速，使通过焦面的胶片速度保持与像移速度一致。这种调节一般是缓慢的、渐变的，不是很迅速、突变的，因此不会产生较大的过载和冲击。

如图所示，在量片辊旁边并没有压辊，而是在它的左侧和下侧分别设置了两个导片辊，引导胶片通过量片辊时，在量片辊上形成大于 180° 的包角，同时，加在供片轴和收片轴上的摩擦力矩使胶片保持一定的张紧力，这样在量片辊和胶片之间有足够的为输片所必须的摩擦牵引力。不用压辊的好处是可以避免损伤乳剂面和产生静电。

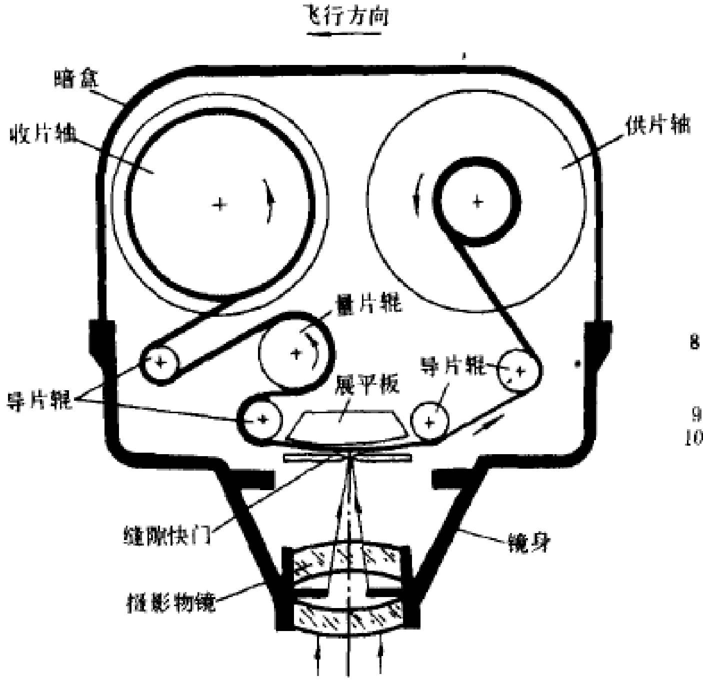


图 9-16 缝隙航空摄影机的连续输片机构

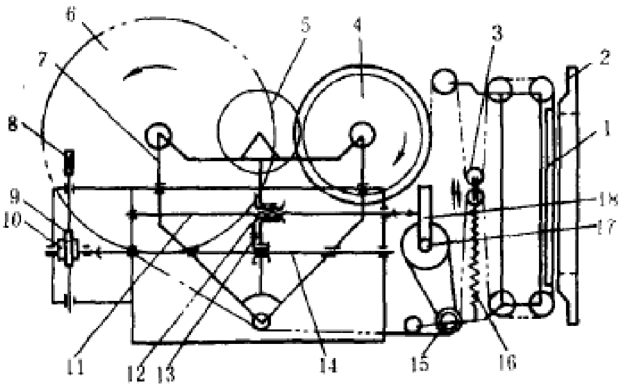


图 9-17 分幅航空摄影机的连续输片机构和自动平衡输片机构

图 9-17 是一种分幅航空摄影机的连续输片机构示意图。分幅摄影机的胶片需要逐幅停留、展平、曝光和更换，因此也需要采用储片器来协调供、收片轴的连续输片和胶片在焦面处的间歇运动。图中的活动导轮 11 就起到这种储片器的作用。

当胶片被压板 1 压紧在镜箱的承片框 2 上时，收片轴 4 由于电机 5 的带动，要继续收卷胶片。于是储片器 3 被胶片拉着向上移动，提供已曝光胶片给收片轴收卷。同时，储片器也将供片轴 6 上的未曝光胶片拉退下来，储存在储片器下方。这时，弹簧 16 被拉紧。

曝光结束后，压板 1 松开胶片时，储片器 3 在弹簧 16 的作用下迅速向下移动回到原位。这时，储存在储片器下方的未曝光胶片便迅速移入焦平面，更换已曝光的一幅胶片，并把它储存在储片器上方，给连续旋转的收片轴收卷起来。

暗盒内的胶片随着拍摄过程的进行，从供片轴逐渐转移到收片轴，整个暗盒的重心也发生相应的转移。载片量愈大，重心的移动也愈大。这种变化对航空摄影的质量会产生有害的影响。因为，航空摄影机的载片量一般较大。同时，航空摄影机一般安装在专门的减振座架上，减振的效果与航空摄影机的重心位置有关。当航空摄影机用陀螺稳定时，这种重心的移动也使陀螺稳定装置难于工作。

图 9-17 中的分幅航空摄影机的输片机构，就设有自动平衡输片机构，能够随胶片从供片轴到收片轴的转移，自动调节暗盒的重心位置。如图所示，由于收片轴连续不断地收卷胶片，供片轴连续不断地退下胶片，皮带轮 15 被连续运动的胶片带动旋转，并通过蜗杆 17、蜗轮 18 使丝杠 11 旋转，于是整个活动片架 7 由螺母 12 带动沿方杠 14 向左移动。恰当地设计自动平衡机构的传动比，可以使活动片架的移动补偿暗盒重心在输片过程中的变化。

装片时，需用手把摇动杆 8，通过蜗轮蜗杆传动 10、9 和齿轮传动 13，使螺母 12 在丝杠 11

上向右移动，将活动片架 1 移回到初始位置。

图 9-18 所示为在一种高空侦察摄影机里采用的自动平衡连续输片机构。这种摄影机的载片量和像幅尺寸都很大。每张航空像片的幅面是 $456\times456mm^2$，由两卷 9½吋宽的薄片基胶卷拼成。每卷胶卷长 2000m，厚 0.1mm。这样重的胶卷，如果采用常规输片机构的安排方式，拍摄前后重心势必有较大的变动。因此，在这种相机里，采用了图 9-18 所示的安排方式。左右两对片辊是相对布置的，一卷向左（飞行方向）卷绕，另一卷向右（与飞行方向相反）卷绕。这样，重心可保持不变。

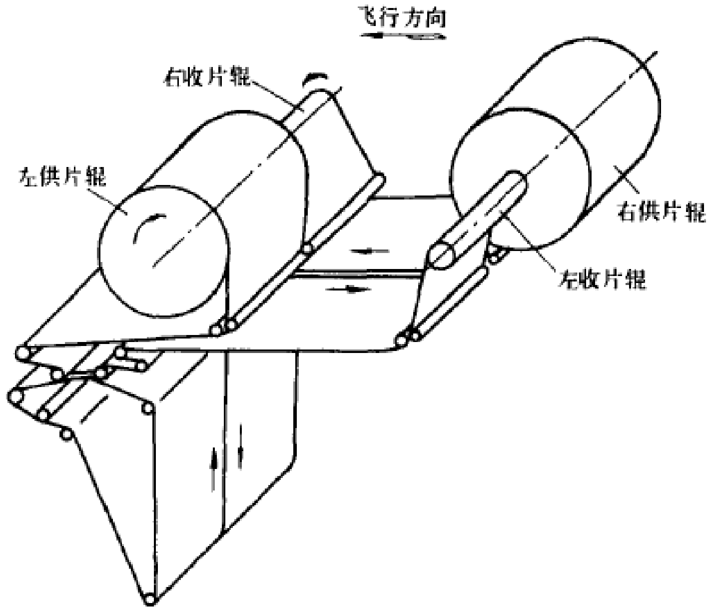


图 9-18　片辊相对布置的自动平衡输片机构

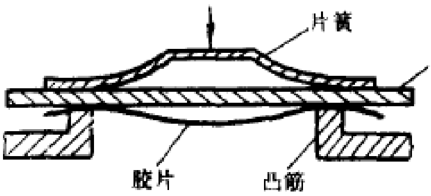
§9-2　展平机构

胶片的片基薄而且比较柔软，它本身不能保持准确的形状，因此在曝光时需要依托一定的基准和借助一定的外力，使它的乳剂面与摄影物镜的清晰像面保持精确重合，这就是所谓胶片的展平。展平的质量直接影响影像的质量。展平误差，即胶片的乳剂面与物镜的清晰像面之间的不重合度，会引起影像像点模糊和像点位置的误差。

普通照相机的像幅尺寸小，对展平精度的要求也比较低，因而展平机构一般都很简单。其展平板（或称压片板）一般都设置在后盖上。照相机机身画幅框两侧通常加有两条平直的凸筋来承托胶片，凸筋的方向与胶片拉动的方向相同，凸筋的表面必须仔细磨平。图 9-19 所示为两种展平结构的比较。(*a*)为直接压片方式，(*b*)为间接压片方式。直接压片方式是用片簧和压板把胶片直接压紧在凸筋上。展平效果并不理想，如图 9-19(*a*)所示，由于胶片片基的弹性变形，在两侧压紧后，中间可能向画幅框内凸出。而且卷片时，胶片在压片板和凸筋之间强行拉过，容易划伤或产生静电。现在大多数小型照相机采用图 9-19(*b*)所示的间接压片方式。画幅框两侧的凸筋各有内外两条，外筋比内筋要高出一个等于或略大于胶片厚度的尺寸。片簧将压板压紧在外筋上，胶片则在压片板下与内筋之间的间隙中靠输片机构施加的拉力拉直。这个间隙，对 135 胶卷为 0.20mm，对 120 胶卷（包括背纸在内）为 0.30mm。

在航空摄影机中，由于像幅尺寸大，展平问题显得更加重要。尤其是航空测量相机，由于对像片的坐标量测精度的要求很高，因而这类相机对展平精度的要求也很高。

航空摄影机中展平胶片的方法主要有机械展平法和气压展平法两类。机械展平法的展平机构如图 9-20 所示。需要曝光时，展平机构的凸轮使压板下降，把胶片压紧在展平玻璃上。在压板与胶片接触的一面做出一些凹槽，以便排除压板与胶片之间的空气，防止它对展平精度的影响。展平玻璃是精确加工的平行平板玻璃，它的上表面是胶片展平的基准面，并与物镜的清晰像面精确地校准重合。机械展平法的展平精度较高，展平玻璃上还可以刻制必要的标记作为



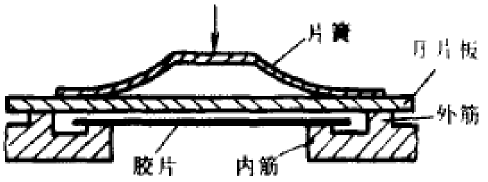


图 9-19 小型照相机的展平机构

坐标量测的基准。例如有的航空测量相机的展平玻璃上刻有许多十字标记，分布成间距精确的直角网格，与地物同时成像在胶片上，测量时可以用来纠正像点的坐标误差。然而，因为展平玻璃位于物镜的焦平面上，它的表面质量、内部缺陷和上下两面的平行度都对影像质量有直接的影响。因此，不仅对展平玻璃的材料和加工质量要求很严，而且在光学系统设计时必须考虑平行平板玻璃造成的像差。

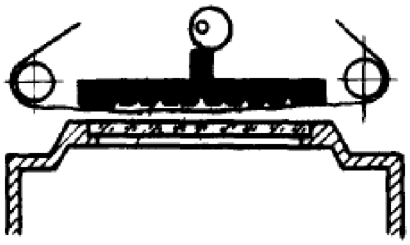


图 9-20 机械展平法

气压法展平是在航空胶片两面造成一定的压差，使胶片在气压的作用下紧贴在压板的表面。因此，压板表面是胶片展平的基准面，压板表面的质量对展平精度有直接的影响。增加胶片的张力和展平时的压差可以提高展平精度，但前者受胶片允许变形的限制，后者受压板变形的限制。

气压法有减压法和增压法两种。减压法(图 9-21)是用气泵把胶片与压板之间的空气从压板的气槽和气室抽走，造成负压，把胶片紧贴在压板上。增压法(图 9-22)与减压法相反，是用气泵向镜箱内吹气，使胶片下表面的压力大于上表面的压力，从而紧贴在压板表面。在压板与胶片接触的表面也有排气槽。

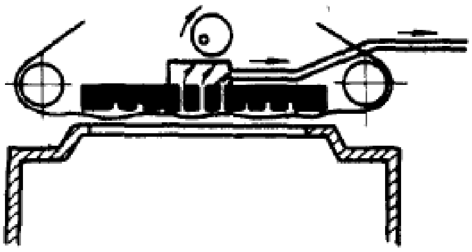


图 9-21 减压展平法

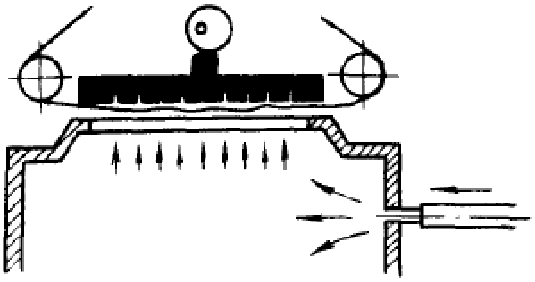


图 9-22 增压展平法

气压法的缺点是，胶片的展平精度随着摄影高度的增加而降低，因为高空的空气密度减小，无论减压法或增压法所能造成的压差也随之减小。

航空胶片展平质量可用以下方法检验。

细丝定位法是最简单最快的方法。将四条直径不超过 0.2mm 的细丝拉直并固定在成象焦平面附近(坐标框上)，使这些细丝离开坐标框平面 1～2mm，与像幅边缘相距 2cm(图 9-23)。如果展平情况良好，细丝阴影在航空胶片上所成的像是直线。反之，当胶片的表面不是平面时，细丝的阴影必然是波形或曲线形。用细丝定位法只能检验像幅中心较远部分的航空胶片展平情况。

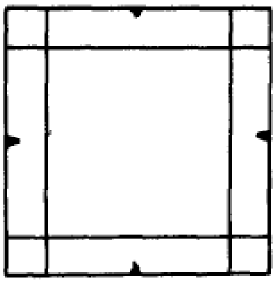


图 9-23 用细丝定位法检验展平精度

在带有展平玻璃的航空摄影机中，广泛采用所谓“网格”的方法，即在展平玻璃上刻制有若干作为坐标基准的十字或点，构成一个测量坐标网。在不用展平玻璃的摄影机中，则常在坐标框四周附加一定形式的坐标基准标，如 9-28 中所示。这些网格或坐标基准标均拍摄在每一张航空胶片上，作为检验测量胶片变形的依据。

除了上述这些实际获得应用的检验方法外，还有一些实验室的方法。例如所谓光影法，用倾斜的光线去照射展平后的胶片，可将胶片表面的起伏放大成宽得多的阴影。又如采用干涉原理，可根据干涉图形的分布情形，确定展平胶片中极细微的不平度。但这些方法都只能在航空摄影机使用之前或之后检验和评价摄影机的性能，而无法指示实际摄得的每张航空相片的展平精度。

用抽气法展平胶片的航空摄影机中，也可以采用测量压板背面的真空度的方法来间接检查展平精度。图 9-24 是按气压计检查胶片展平的示意图。

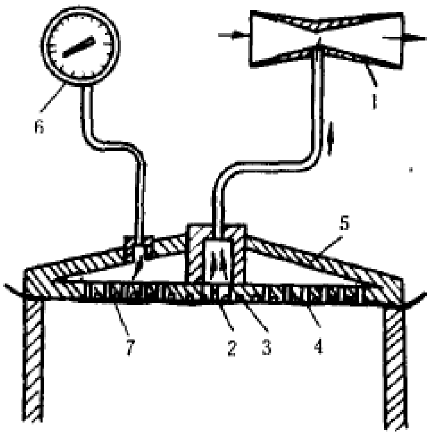


图 9-24 用气压计检验展平质量

当胶片展平良好时，所有与密封室 5 相通的小孔均为胶片所闭塞，因此，密封室 5 内的空气不能从这些小孔抽出。于是，气压计的指针停留在零位。当胶片展平不良时，在展平压板的槽 3 和小孔 4 之间形成了空气走廊 7，密封室 5 内的空气开始通过它经中央孔 2 抽出。这时，气压计即指示出密封室 5 内的真空度。当胶片断裂或其它漏气情形时，气压计的指针归零。因此，用气压计也可指示出胶片的这类缺陷。气压计的指示数可以用摄影的方法记录在每一张照片的边缘或角上。

§9-3 计片装置

除了在机身内只能储存一张底片的大型座机或某些新闻镜箱，和某些使用干板的照相机外，无论是小型照相机还是航空摄影机，一次装片都能拍摄一定数量的照片。因此，绝大多数摄影机都有计算和指示所摄像幅数量和序号的机构或装置，叫做计片装置，或称计数机构。航空摄影机由于载片量较大，需要知道在执行给定的摄影任务后还剩余多少胶片，因此，往往有测量和指示剩余片量的机构，称为剩余片量指示器。

普通摄影用的小型照相机的计片装置，主要有手动复位计数机构和自动复位计数机构两类。手动复位计数机构在每次装片后，需要将计数盘数字拨回“0”位，如果忘记就会出错。因此，现在大多数小型照相机采用自动复位计数机构。

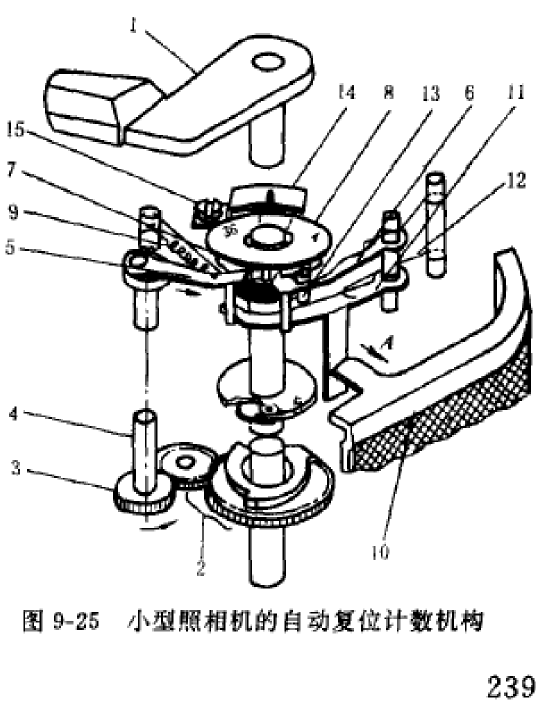


图 9-25 小型照相机的自动复位计数机构

图 9-25 所示为自动复位计数机构的结构示意图。当逆时针扳动卷片扳把 1 卷片时，通过齿轮系 2 的传动，使齿轮 3 和轴 4 也逆时针转动。轴 4 上端的偏心钉推动计数送字爪 5 来回摆动一次。当送字爪向右摆动时，推动棘轮 7 和计数盘 8 转

过一个数字。当送字爪往回摆动时，棘轮的齿被锁定爪 6 钩住而不能倒转。棘轮上有一小段没有齿，使计数盘走到"36"以后不会再转动。

当打开后盖 10 时，原来被后盖顶住的回零杠杆 11 在扭簧 12 的作用下向箭头 A 的方向摆动，使送字爪 5 和锁定爪 6 离开棘轮 7，棘轮在复位拉簧 9(也有的计数机构用扭簧)的作用下迅速反转，计数盘的数字回到"S"。销子 13 在计数盘回到 S 时起定位作用。用螺钉 15 可以调整指标板的位置，使指标对准计数盘上的数字。

图 9-26 所示是一种航空摄影机的胶卷盒中的剩余片量指示器结构图。片量传感臂 19 的小滚轮 20 在传感臂轴上扭簧的作用下，始终靠在胶卷的表面。随着片轴上卷缠的胶卷直径的

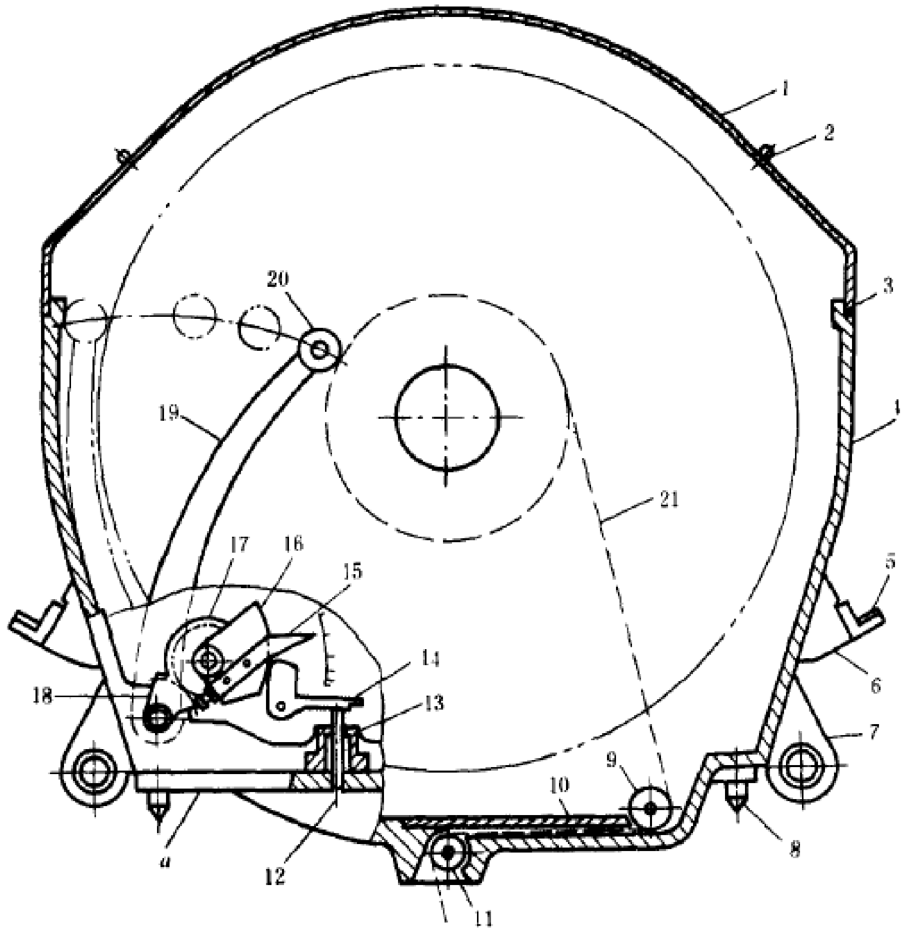


图 9-26 航空摄影机胶卷盒的剩余片量指示器

1—顶盖；2—片头固定销；3—凸缘镶嵌防漏光结构；4—盒体；5—凸钩；6—凸台；

7—凸耳；8—定位销；9—导片辊；10—隔光板；11—导片辊；12—柱销；13—盒体侧腔凸台；

14—"L"形杠杆；15—指针；16—凸轮；17—齿轮；18—扇齿轮；19—片量传感臂；20—小滚轮；21—胶片

增大或减小，传感臂向外或向内摆动。传感臂的摆动又通过扇齿轮 18 和齿轮 17 的传动，使固定在凸轮 16 上的指针 15 指示出概略的剩余片量。数字与刻度刻制在胶卷盒侧板的一个月牙形玻璃窗上(图中仅示意地表示月牙玻璃上的刻线)。因此，不打开胶卷盒就可以知道胶卷盒内剩余多少胶片。

当胶卷用完时，片量传感臂 19 的位置通过凸轮 16 和杠杆 14 使柱销 12 抬起。柱销 12 的下端在胶片未用完时，接通暗盒内的供片开关和联锁电路。现在，柱销的抬起使供片开关和联锁电路断开，暗盒内的输片机构停止工作，同时在座舱控制盒面板上的指示灯点亮，使飞行员知道相机的胶卷已经用完。

§9-4 记录装置

为了正确地反映每一张相片拍摄时的条件，需要在每张照片上记录下必要的数据，如相片序号、摄影日期、拍摄时间，对于航空摄影来说，还有侦察或测量摄影任务代号、航线编号、摄影高度、曝光时物镜光轴的倾斜度、摄影机的标定焦距及出厂编号等，对于摄影经纬仪等带有测角机构的摄影仪器则还有方位角和俯仰角等数据。这些数据信息要求在该幅底片摄影时就同时摄在画幅的边缘、角落或相邻画幅的间隔中，作为说明曝光瞬间各种状况的资料。实现这些数据摄入的装置称为记录装置。

航空像片上记录数据的形式主要有实物、数字、标记和代码等。长期以来，像片序号、摄影时间、高度和曝光时物镜光轴的倾斜度等主要是用光学投影系统把机械记数器、秒表、高度表和水准器等实物的数码、指针和水泡等直接投影在底片上。图 9-27 是一种航空侦察相机的记录装置。记数器 2、秒表 3 和记事板 4(在记数器上、下各一条，主要用来书写侦察摄影的任务代号和摄影日期)安装在仪表座 1 上，并由灯泡 4 照明，反射光通过光阑 5 后由物镜 6 成像在由坐标框记录窗 8 所限制的胶片范围内。控制电路控制照明灯的光强和照明时间，使实物和数据的像在胶片上获得合适的曝光量。灯泡 7 用来照明并摄入坐标框记录窗旁边的空心标记——航线编号“*2L*”和“*V*”。当垂直摄影时，照明“*V*”的灯泡点亮；当摇摆倾斜摄影时，照明“*2L*”的灯泡点亮。

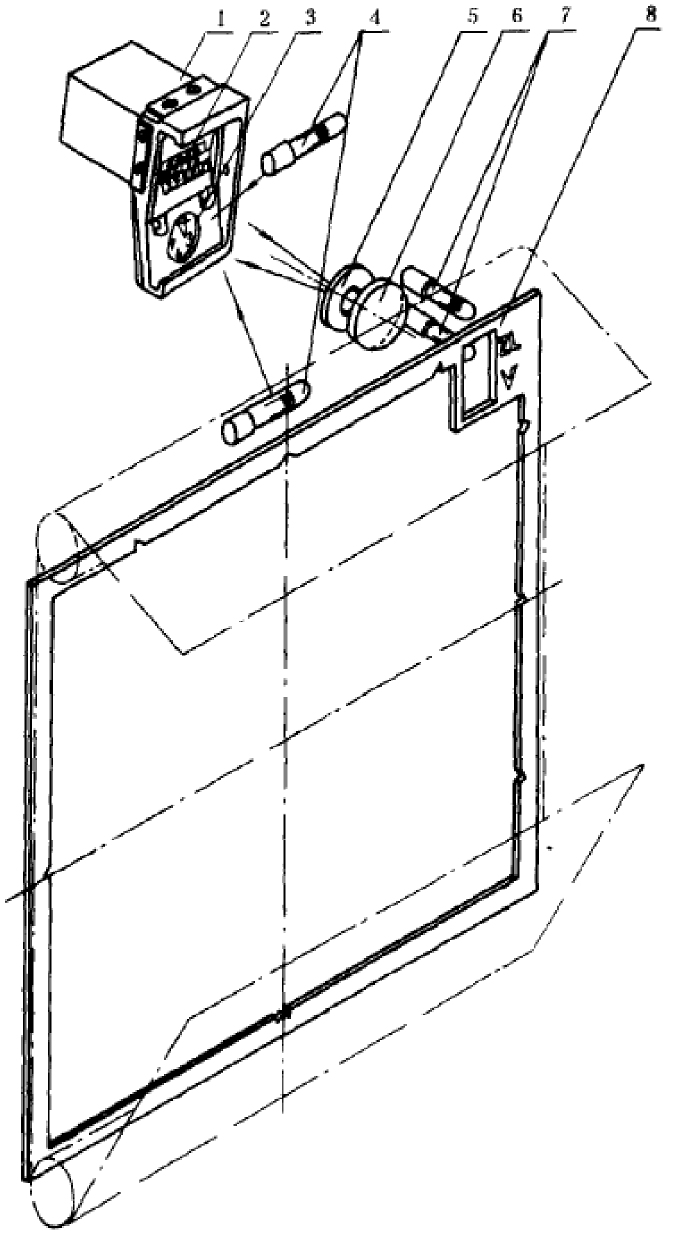


图 9-27 航空侦察相机的记录装置

图 9-28 为一种航空测图相机的坐标框。坐标框所限制的范围就是航空像片的幅面大小，在图 9-28 所示的例子中它等于 $18\times18\text{cm}^2$。在坐标框两对边的中点共有四个小孔和箭头状标记，它们连线的交点决定像片的主点(在有的航空摄影机中，这些基准标记布置在画幅的四角，两条对角线的交点决定出像片的主点)。

对于测地制图的航空摄影来说，对照片正确反映地物位置的要求很高，而在航空摄影过程中，使照片上的影像位置产生畸变的因素是非常之多的，其中包括，例如，物镜的畸变，大气扰动引起光路的改变，胶片受机械力所产生的弹性变形，展平误差，以及胶片在冲洗后产生的收缩等塑性变形，等等。

为了在应用航空照片测制地图时消除这些变形所带来的误差，常在摄影机坐标框平面内设法引进一定的坐标基准标。例

如图 9-28 的摄影机坐标框四周嵌有四条玻璃尺，它们上面间隔尺寸(1cm)精确的坐标线拍摄在每一张航空照片上，从而可以判定胶片各部分的变形大小，而在制图时引入一定的修正。

由于胶片在展平时紧贴在坐标框的基准面上，因此上面所说的像主点基准标记和玻璃尺上的坐标基准标是在每幅像片曝光的同时拍摄在画幅边缘的。照明光有两种，一种利用来自地物的自然光，这种方法的缺点是，有时像幅边缘的地物影像恰好处于阴影中，往往使基准标记曝光不足；另一种方法是用单独的灯泡照明基准标，可保证合适的曝光量，获得高反差、高清晰度的基准标影像。

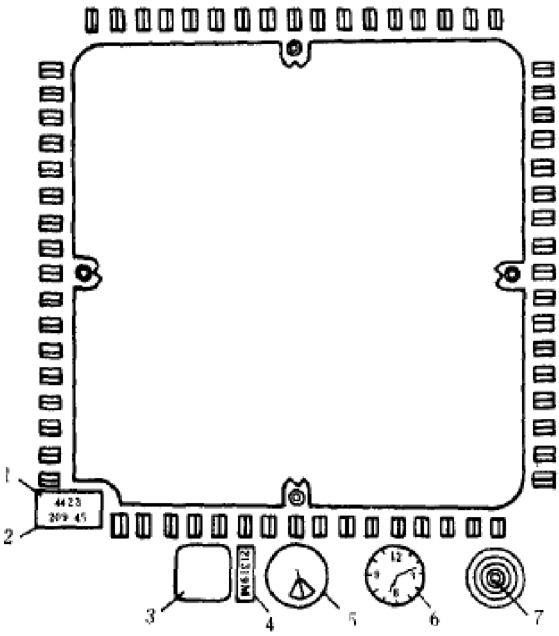


图 9-28　航空测图相机的坐标框

随着传感器和计算机技术的发展。数字形式的摄影信息在许多方面代替了模拟的、实物的信息形式。数字化的摄影信息便于用计算机进行处理和通讯，因此，在航空摄影中记录数据的形式也逐渐用数字电路控制的发光二极管阵列显示的数字和代码代替如图 9-27 和图 9-28 中的那些实物仪表了。

图 9-29 是一种光棒式全景航空摄影机的底片上记录的数据和标记。如图所示，这些数据和标记包括扫描中心基准标记、定间隔基准标记、切片标记、飞行方向和胶片运动方向标记和幅数标记(即像片序号)以及时间标记(摄影时间)等。

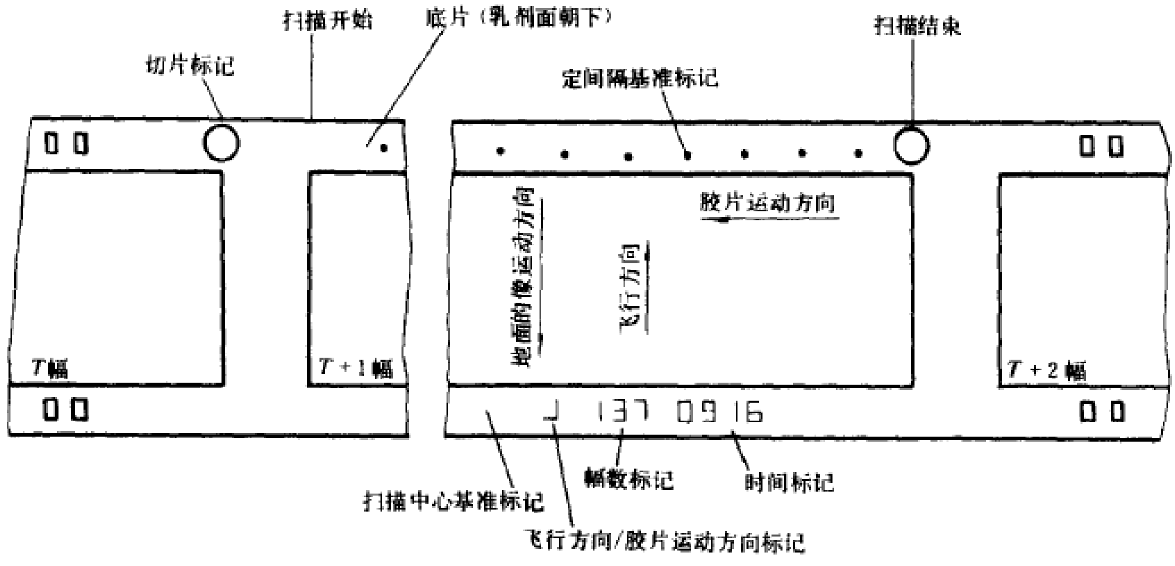


图 9-29　全景像片记录的数据和标记

扫描中心基准标记以一个位于每幅全景像片画幅中点的实心小圆点表示扫描中心点的位置。定间隔基准标记是一组等间隔的实心小圆点。由于光学镜筒的扫描速度是恒定的，因此这组标记实际上也是定间隔时间标记，或简称时标。它对于全景像片的测量和纠正是很有用的。切片标记位于像幅的末端，它是在胶片冲洗时使切片机产生切片动作所需要的标记。飞行方向和胶片运动方向标记呈反“L”形，其两边分别表示飞行方向和胶片运动方向(见图 9-29)。接在方向标记后面的三位十进制数字是表示像片顺序号的幅数标记。最后四个数字是表示每幅像

片拍摄时间的时间标记。前两位数字是二十四进制的“小时”数，后两位数字是六十进制的“分”数。

基准标记和切片标记都是由微处理机控制的发光二极管在给定时间点亮使胶片曝光而产生的。方向、幅数和时间标记则是将七段阵列发光管显示的数字和符号通过投影物镜成像在胶片上产生的。七段阵列发光管由微处理机通过数字电路来控制。

图 9-30 是产生方向、幅数和时间标记的电路方块图。如图所示，胶片轮电机编码器发生的定时脉冲周期等于胶片轮上的胶片移动 0.37 毫米的距离所需要的时间。定时脉冲经过计数器和译码器的加工变成标记电路的控制信号。

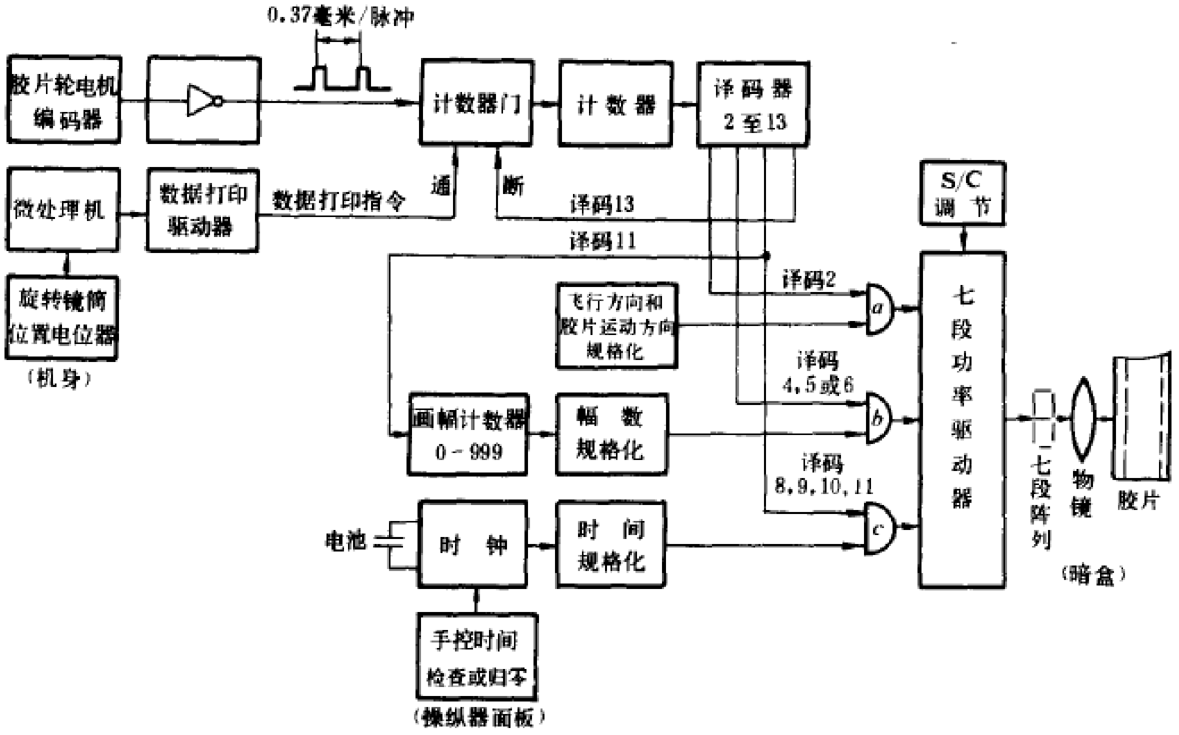


图 9-30 方向、幅数和时间标记电路方块图

定时脉冲何时能通过计数器门进入计数器要受数据打印驱动器的控制。微处理机根据旋转镜筒位置电位计反映的旋转镜筒位置信号，在旋转镜筒处于给定位置时，通过数据打印驱动器发出数据打印指令，打开计数器门，让定时脉冲进入计数器和译码器。译码器即对计数器产生的十进制数 2 至 13 顺序进行译码。每相邻两个数译码的时间间隔相当于焦面轮上的胶片移动 1.45 毫米的距离。

当译码器译码数 2 时，打开“与”门 a，让飞行方向和胶片运动方向信号进入七段功率驱动器，使七段阵列发光管显示图 9-29 所示的方向标记，并通过投影物镜在胶片上曝光。

当译码数 3 时，门电路都关闭。胶片在方向标记后面恰好留下 1.45 毫米的空白，作为方向标记和幅数标记的百位数字之间的字间距。

当译码数 4、5 和 6 时，打开“与”门 b，让画幅计数器的三位十进制画幅数信号进入七段功率驱动器，推动七段阵列发光管显示画幅数字。因为标记的发光只用了一个七段发光管，每次只能曝光一个字符或一位数字，所以画幅数的三位数字是一个一个顺次显示并曝光在胶片上的。当译码数 4 时，仅仅选通三位十进制画幅的“百”位数字进入七段阵列，因而在胶片上先曝光了一个百位数字；当译码数 5 时，仅仅选通“十”位数字进入七段阵列；译码数 6 时，仅仅选通“个”位数字进入七段阵列，所以在百位数字后面，以 1.45 毫米的等间距相继曝光了十位数字

和个位数字，而画幅计数器本身要在译码器译码数 11 时才增加一。画幅计数器由三个串接的十进计数器组成，可产生从 0 至 999 的数字。当相机的电源接通时，画幅计数器自动归零，以后每拍摄一幅相片，计数器加一。计数器的信号可保留 5 秒种。

时间标记的小时和分的十位和个位也是由译码器分别对数 8、9、10、11 顺次译码时，逐个选通到七段阵列，逐个曝光到胶片上去的。而时间标记与画幅数标记之间的 1.45 毫米宽的空格是在译码数 7 时关闭所有的门电路产生的。

提供时间信号的内部时钟电路在相机断电时是靠电池供电的。内部时钟电路可通过电子盒控制面板显示、调整或归零。

当译码器译码到数 13 时，译码器发出一个控制信号把计数器门关闭，计数器归零，直到微处理机在相机的下一个工作循环重新发出一个“数据打印”指令时再开始下一幅照片的标记操作循环。

摄影底片上记录的数据形式，除上面所说的实物、数字和标记外，还有一种是二进制代码矩阵。图 9-31 所示是一种大型电影摄影经纬仪的底片和像幅边缘所记录的二进制代码矩阵示意图。这种二进制代码矩阵是用由编码电信号控制的发光二极管阵列在胶片上曝光得到的。使用这种代码矩阵的优点是在有限的面积上可记录较大的信息量，并且便于用带识别装置的自动处理设备高效率地识别和处理所记录的各种数据。

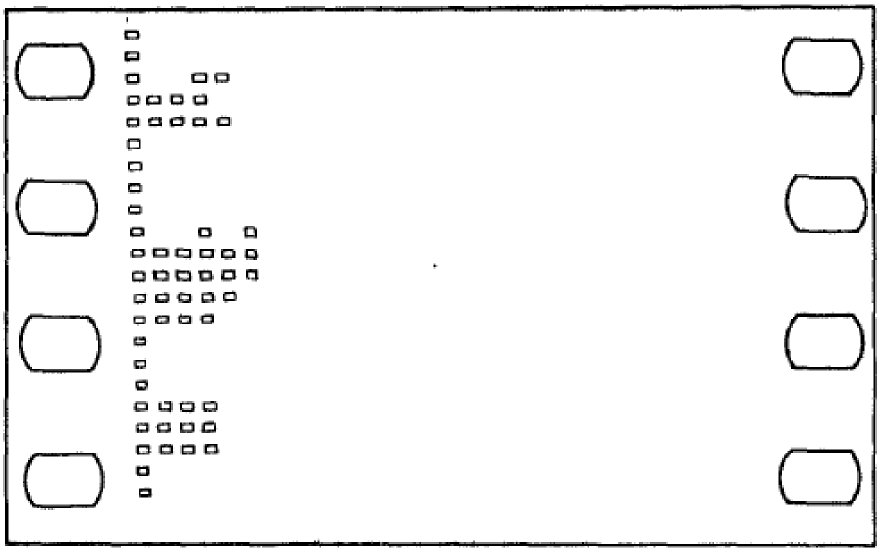


图 9-31 用二进制代码矩阵记录的摄影信息

目前，在小型民用照相机的底片上记录的摄影信息，主要是摄影日期和时间。对摄入装置的要求主要是微型化。近年来在半导体集成技术和光纤技术发展的基础上，解决了数据成象和传导系统以及控制系统微型化的问题，各种数据摄入装置在小型照相机上蓬勃地发展起来了。

小型照相机的数据摄入装置主要由数据载体、照明装置、成象与传导系统和控制电路等组成。

数据载体就是用来书写或贮存所需摄入的数据的物体。用作数据载体的有预制数字、文字或符号的圆盘、圆筒、带状胶片等，有可以随时写入数据、文字的插入式卡片、写入式纸带等。在圆盘、圆筒等上选择所需要的文字、数字作为摄入数据，需要用手在相机外部进行操作，但用发光显示板或液晶显示板来显示摄影年、月、日、时、分、秒等数字则可以与电子钟表一样，由石英电路来自动控制，而不需要手动操作。

照明装置是用来照明数据载体上所需摄入的数据，提供数据在底片上曝光所需要的光量。

用作数据照明的光源可以是自然光、小型灯泡、发光二极管、电子闪光灯放电管、发光涂料等。为了使光源的光强和照明时间能随胶片感光度、电源电压的变化而变化，以保证数据在胶片上的合适曝光量，有的照明装置还设有自动控制照明光强或照明时间的微型电脑。启动照明光源的信号一般由照相机的快门机构给出，也有的是在胶片背面配置受光元件，它接收到的摄影光就是灯泡点亮的信号。

成像与传导系统是用来把数据载体上的数据投影或传递到胶片上，在胶片的感光层上构成清晰的像，目前主要有两类，一类是用传统的小型光学投影系统，包括投影物镜和用来折转光路的小反射镜。

图 9-32 是一种用于单反相机的数据投影系统。被照明灯 1 照亮的透明薄片 2 上的数据通过投影物镜 5 和棱镜 6 成像在摄影胶片 7 边缘的背面。遮光框 3 用来限制数据成像的范围。在遮光框和投影物镜之间的半透明反射镜 4 能把一部分光线反射到棱镜 5，然后再折入取景屏，使摄影者能从取景屏上观察到所要摄入的数据是否正确。

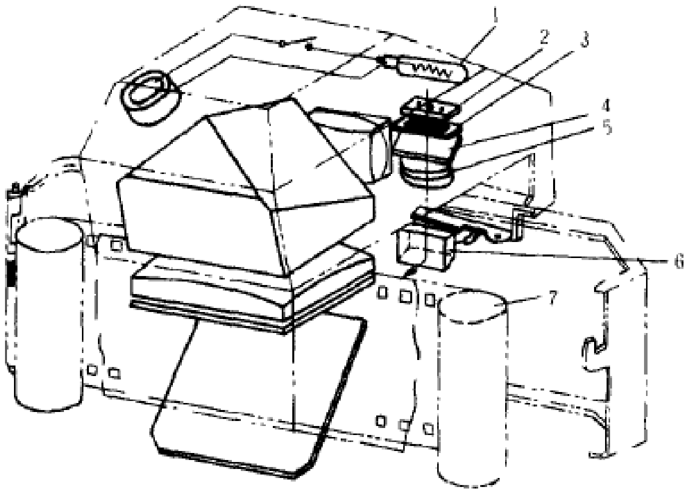


图 9-32　单镜头反光照相机的数据投影系统

另一类是不用投影光学系统而用光导纤维束把数据载体上的数据直接传送到胶片上或取景器中。

控制电路除了控制照明灯的光强和照明时间外，还有防止数据误摄的安全、警告等作用，例如，在装有电子表的数据摄入机构中，当数据(如日期)变更时能自动发出警告，或当发光灯有故障时摄入机构就不工作并用显示灯发出警告等。电源往往与电子闪光、自动控曝共用，但也有分开的。

有的相机的数据摄入装置还把摄影时照明光源的光谱分布也同时摄入，以便在印相时进行检查，提高彩色照片的色再现性。

第十章 像移和像移补偿

像移是一种在摄影中常见的现象。当摄影机与被摄物之间有相对运动时，被摄物通过摄影机的物镜所成的像就会在像面上运动。例如，用摄影机拍摄运动着的物体，或者从行驶中的车、船或飞行中的飞行器上进行摄影，都会产生像移。即使摄影者同被摄物之间没有相对运动，例如手持照相机拍摄静物，如果在快门曝光时，持握相机的手有抖动，被摄物的像也会在像面上产生运动。

在有像移的情况下摄影，因为胶片的曝光需要有一个有限长的时间，所以在曝光时间内像点在胶片上移动的结果，使乳剂层里生成的潜像和显影后产生的影像不再是一个像点，而是沿像移方向伸长的一段线段。像移对摄影质量的影响不仅是使影像产生变形，而且由于相邻像点伸长的线条互相重叠，以致影像模糊不清。

在有些摄影艺术作品中，利用像移造成的模糊线条，夸大被摄物运动的速度，渲染画面的动态气氛，增强视觉效果。但是对于大多数摄影目的来说，总是希望得到清晰的像片。尤其是对于那些要从摄影影像的细节识别所需目标和获取尽可能详细的信息，以及要对影像的形状、大小和坐标位置进行精确测量的摄影任务来说，像移是十分有害的，应当设法消除或尽量减少。

像移对摄影质量的影响程度决定于像移量的大小，而像移量又取决于像移速度和像点的曝光时间，也就是快门的实际曝光时间。在一般情况下，像移速度是随时间或随像点的位置变化的，像移量要用积分的方法求取，即

$$\delta_{像} = \int_{t_{实}} V_{像}\, \mathrm{d}t \tag{10-1}$$

式中 $\delta_{像}$ 为像移量，即像点在曝光时间内沿胶片乳剂层的位移量；$V_{像}$ 为像移速度，在计算像移时应当把与运动物点共轭的像点运动速度投影到胶片乳剂面内的投影；$t_{实}$ 为快门的实际曝光时间。

由(10-1)式可见，可以用两种方法来减小或消除像移量。一种方法是缩短快门的曝光时间，另一种方法是设法使被摄物通过摄影机物镜所成的光学像相对于胶片的运动速度尽量减小或等于零。后一种方法就是所谓的像移补偿。

在普通摄影中，一般是用前一种方法，即缩短快门曝光时间的方法来控制像移量，使它不超过在一定使用要求和一定观察条件下的允许模糊量。只要由像移和其它各种因素产生的模糊量小于人眼的分辨阈限，影像看上去仍然是清晰的。目前，小型照相机的钢片快门，最短曝光时间已能达到 1/2000 s ～1/4000 s，即使不采取像移补偿措施，也能获得高速运动物体的清晰像片。

在航空摄影中，由于装载航空摄影机的飞行器，在飞行中始终处于运动的状态，因此像移是航空摄影中的一个不可避免的特殊问题。航空相片的比例尺较小，影响像清晰度、分辩率和对比等判读性能的因素又很多，无论是航空侦察摄影还是航空测图摄影，都需要从影像中识别目标、辩认细节、测量坐标，只是对于测量精度有不同的要求而已。因此，像移也是影响和限制航空相片质量的一个重要因素。

航空摄影中引起像移的原因很多，其中主要的有：飞行器的前进运动；由于大气中的扰动

气流和空气密度的变化使飞行器承受随机的旋转运动（俯仰、横滚和偏航）；由于地球旋转引起的偏航；由于垂直气流造成高度上的起伏；由于发动机的工作造成的振动以及由于相机机构工作时引起的振动等等，同样原因对不同工作原理的相机造成的像移也各不相同，它们有的可以设法消除或减弱，有的可以完全或部分补偿，有的则暂时还无法消除或补偿。

归纳起来，航空摄影中的像移可能由以下三类运动引起：匀速直线运动，周期振动和随机运动。在航空相机里采用像移补偿机构主要解决飞行器匀速直线运动引起的像移问题，即所谓前移补偿（FMC①），因为由飞行器前进运动引起的像移速度往往较大，而航摄快门速度的提高是很有限的，因此像移补偿对于航空摄影来说是提高影像质量的重要措施。对于安装在高速飞行的航空或航天飞行器上的航空摄影机来说，像移补偿机构甚至是必不可少的。后二种运动的影响，一般采用有效的隔振减振和光轴稳定的措施来解决。

本章主要讨论航空摄影中由飞行器的前进运动所产生的像移和它的补偿方法、补偿机构。

§10-1　航空摄影中像移的计算公式

航空摄影中由飞行器的前进运动引起的像移速度和像移量的计算公式，随不同的摄影方法有不同的具体形式，但它们都是由摄影成像系统的物像共轭关系导出的，彼此有密切的内在联系。下面我们用比较直观的几何方法来推导在垂直分幅航空摄影、倾斜分幅航空摄影和全景航空摄影等几种特殊情形下的像移计算公式。

一、垂直分幅航空摄影中的像移

垂直分幅航空摄影时，由飞机的前进运动所产生的像移速度和像移量的计算公式可由图10-1所示的几何关系导出。

假定胶片已经展平在航空摄影机物镜的焦平面上，胶片的乳剂面与物镜的焦平面精确地重合。在快门开始打开（胶片开始曝光）的瞬间，航空摄影机处于位置Ⅰ。这时地物上的 P 点成像在 p 点。由于在快门的开启时间内，飞行器载着摄影机不断地向前运动，因此，像点 p 也在不断地沿焦平面移动。当快门关闭（胶片结束曝光）时，航空摄影机运动到位置Ⅱ。这时，地物上 P 点的像移动到 p' 点的位置。这就是说，由于飞行器前进运动产生的像移，地物上 P 点在胶片上的摄影影像，实际上不是一个 p 点，而是沿像移方向伸长了的一段线段 pp'，线段的长度就是像移量。

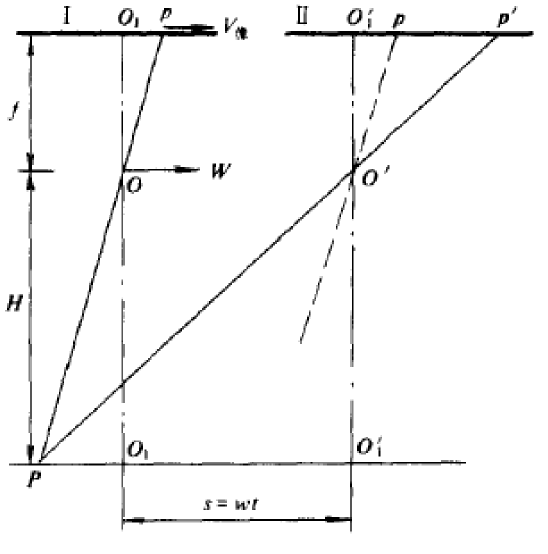


图 10-1　垂直分幅航空摄影中的像移

为了和后面的讨论的一致起见，我们把图10-1所示的物像关系表示在三维直角坐标 $OXYZ$ 中如图10-2所示。坐标系的原点 O 与物镜的节点重合，Z 轴与光轴重合，X 轴方向与飞行器的地速（飞行器相对于地面的速度）W 的方向一致。该坐标系随摄影机一起运动。另取直角坐标系 O_1xyz，原点 O_1 与像幅的主点重合，坐标轴

① FMC 是英文 forward-motion compensation 的缩写。

O_1x 和 O_1y 在像幅平面内且分别平行于 OX 轴和 OY 轴，O_1z 轴则与 OZ 轴重合。

飞行器在执行摄影任务时，一般是作匀速直线和水平飞行的。假定所拍摄的地面景物也是一个水平面，(当景物的高程变化比起摄影高度小得多时，可忽略景物高程变化引起的像比例尺的变化)，那末，地速 W、摄影高度 H 和摄影机物镜的焦距 f 都不变，又因为在垂直分幅航空摄影中，像幅上各点的比例尺相同，所以由图 10-1 和 10-2 所示的几何关系可知，像移速度在坐标轴 O_1x 和 O_1y 上分量分别为

$$V_{像x} = W\frac{f}{H} \tag{10-2}$$

$$V_{像y} = 0 \tag{10-3}$$

且在快门的曝光时间内保持不变。于是，像移量在两个坐标轴 O_1x 和 O_1y 方向上的分量分别为

$$\delta_x = V_{像x}t = W\frac{f}{H}t \tag{10-4}$$

$$\delta_y = 0 \tag{10-5}$$

式中 t 为快门的实际曝光时间。

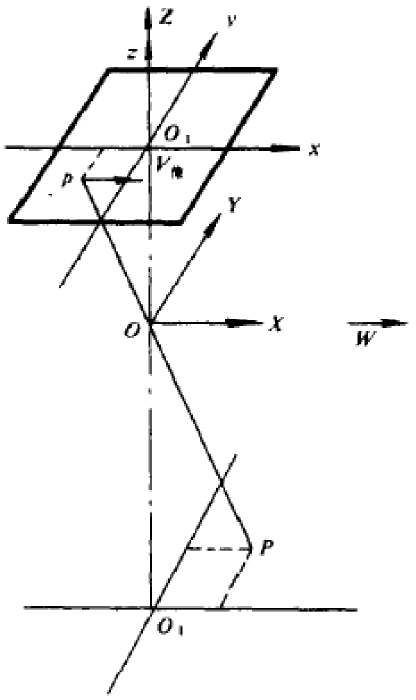


图 10-2　在三维直角坐标系中表示垂直分幅航空摄影中的像移

二、倾斜分幅航空摄影中的像移

我们先讨论两种较简单也是实际常使用的情形：一种是为扩大拍摄范围常采用的侧倾摄影机，一种是在攻击侦察机中常采用的前倾摄影机。

1. 侧倾分幅航空摄影中的像移　相机侧倾以后，地面上矩形网格状的地物和它在侧倾底片上的像之间的几何关系，可以画成如图 10-3 所示的形状。

由图 10-3 可见，由相似三角形 OPP' 和 Opp' 可得

$$\frac{Op}{OP} = \frac{Op'}{OP'} \tag{10-6}$$

因此，当我们把图 10-3 画成如图 10-4 的样子时，图 10-4 中，设飞行方向 W 和 X 轴方向均与纸面垂直(为离开纸面)，则胶片上任一点 p 的像移速度为

$$V_{像x} = W\frac{Op}{OP} = W\frac{Op'}{OP'} \tag{10-7}$$

$$V_{像y} = 0 \tag{10-8}$$

又由图 10-4

$$OP' = \frac{H}{\cos(\varphi - \beta_y)}$$

$$Op' = \frac{f}{\cos\beta_y}$$

式中 φ 为光轴侧倾角，β_y 为 p' 点的像场角。

代入(10-7)式并化简得

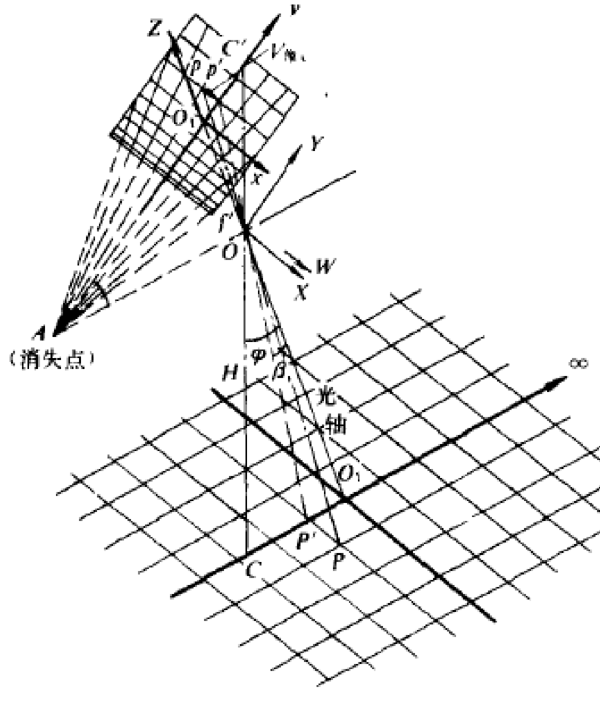


图 10-3　侧倾分幅航空摄影中的像移

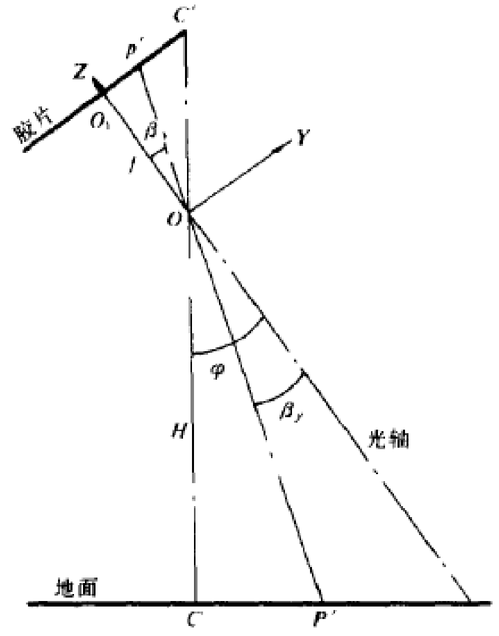


图 10-4　用 YOZ 坐标平面表示的物像关系

$$V_{像x} = \frac{Wf}{H}(\cos\varphi + \sin\varphi\,\mathrm{tg}\beta_y)$$

$$= \frac{W}{H}(\mathrm{f}\cos\varphi + \mathrm{y}\sin\varphi) \tag{10-9}$$

因此，像移量应等于

$$\delta_x = \frac{W}{H}(\mathrm{f}\cos\varphi + \mathrm{y}\sin\varphi)t_{实} \tag{10-10}$$

$$\delta_{t_{实}} = 0 \tag{10-11}$$

由公式(10-10)可知，像移的方向与飞行方向相同，它的大小是像点在胶片上的坐标 y 的函数。

2. 前倾分幅航空摄影中的像移　参看图 10-5。由于摄影机前倾，X 轴方向与地速的方向不再重合，两者之间夹一前倾角 ψ。同时由图可见，地面矩形网格的前倾像片，由于比例尺变化的关系，地面上与 X 轴平行的线在像面上也成了以消失点 A 为顶点的辐射线状。因此当飞机沿 W 方向运动时，像将沿这些辐射线的方向移动。任意一点 p 的像移速度 $V_{像}$ 可以分解成 $V_{像x}$ 和 $V_{像y}$ 两部分，如图 10-5 左上角的小图和右上角的平面图所示。

我们先讨论 $V_{像x}$。由图 10-5 可见，对于 x 坐标相同的各点(例如 p 和 p' 点)，$V_{像x}$ 相同。因此，我们可以讨论 x 轴上的 p' 点来代表任意点 p，画出图 10-6 的样子。

求像片上任一点 p 在 x 方向的像移速度时，必须注意到这样一点，即，由于地速 W 引起像点 p 沿胶片移动时，β_x 角连续不断的变化，引起比例尺 Op'/OP' 的变化。

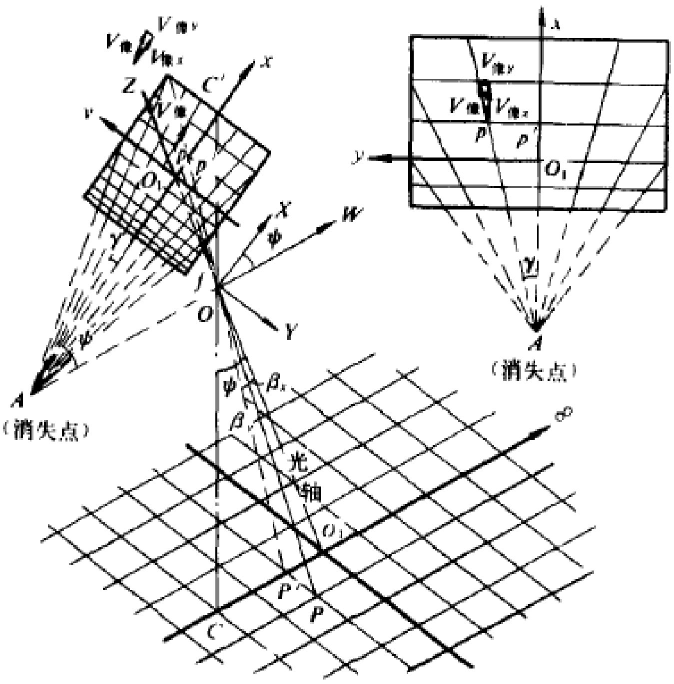
因此

$$\dot{\beta}_x = \frac{V_{像x}\cos\beta_x}{Op'} = \frac{W\cos(\psi - \beta_x)}{OP'} \tag{10-12}$$

式中 ψ 为光轴前倾角。又，由图 10-6 有

$$OP' = \frac{H}{\cos(\psi - \beta_x)},\quad Op' = \frac{f}{\cos\beta_x}$$

代入(10-12)式，得



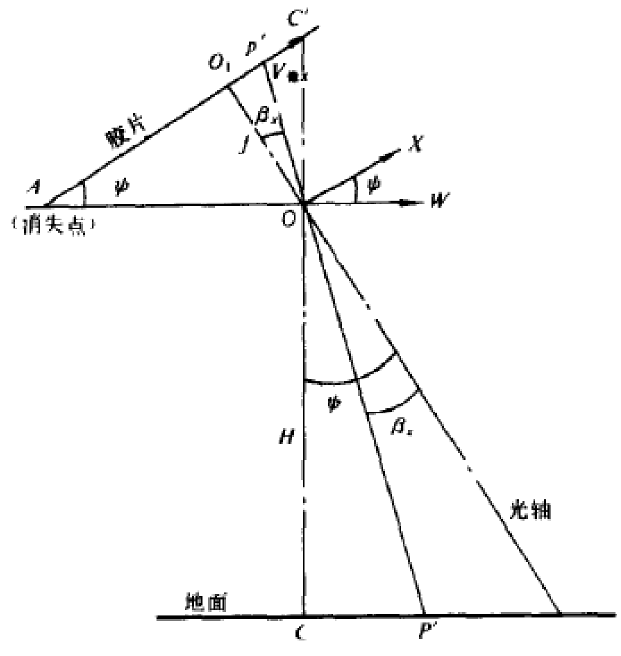


图 10-5　前倾分幅航空摄影中的像移　　　　图 10-6　用 YOZ 坐标平面表示的物像关系

$$\frac{V_{像x}\cos^2\beta_x}{f}=\frac{W\ \cos^2(\psi-\beta_x)}{H}$$

因此

$$\begin{aligned}V_{像x}&=\frac{Wf}{H}\frac{\cos^2(\psi-\beta_x)}{\cos^2\beta_x}\\&=\frac{Wf}{H}(\cos\psi+\mathrm{tg}\beta_x\sin\psi)^2\\&=\frac{Wf}{H}(\cos\psi+\frac{x}{f}\sin\psi)^2\end{aligned}\tag{10-13}$$

我们再来求 y 方向的像移速度 $V_{像y}$。由图 10-5 可见

$$\frac{V_{像y}}{V_{像x}}=\mathrm{tg}\gamma\tag{10-14}$$

而

$$\mathrm{tg}\gamma=\frac{pp'}{Ap'}=\frac{y}{AO_1+x}\tag{10-15}$$

又由图 10-6

$$AO_1=f\ \mathrm{ctg}\psi\tag{10-16}$$

将(10-15)和(10-16)式代入(10-14)式并化简后得

$$V_{像y}=\frac{V_{像x}y}{x+f\mathrm{ctg}\psi}=\frac{V_{像x}y\ \sin\psi}{f(\frac{x}{f}\sin\psi+\cos\psi)}\tag{10-17}$$

将(10-13)的 $V_{像x}$ 代入(10-17)式，最后得

$$\begin{aligned}V_{像y}&=\frac{Wy}{H}\sin\psi(\cos\psi+\frac{x}{f}\sin\psi)\\&=\frac{W}{H}(y\sin\psi\cos\psi+\frac{xy}{f}\sin^2\psi)\end{aligned}\tag{10-18}$$

由公式(10-13)和(10-18)可知，像移速度与像点的坐标有关，像移量应当用积分来求取。因此，如下形式的像移量公式是近似的

$$\delta_x = V_{像x}t = \frac{Wf}{H}(\cos\psi + \frac{x}{f}\sin\psi)^2 t_{实} \tag{10-19}$$

$$\delta_y = V_{像y}t = \frac{W}{H}(y\sin\psi\cos\psi + \frac{xy}{f}\sin\psi^2)t_{实} \tag{10-20}$$

三、全景航空摄影中的像移

垂直全景航空摄影的像片可以看成是许多 y 方向极窄的侧倾分幅摄影像片的合成，但每一单元像片的侧倾角度随其扫描位置而依次相差一个很小的值。同时，由于全景航空摄影机中，胶片安置在以 f 为半径的圆弧上，因此，每一点的 y 坐标均可认为是等于零。这样，由于飞机前进运动引起的像移速度，可以用公式(10-9)和(10-8)写成

$$V_{像x} = \frac{Wf}{H}\cos\varphi \tag{10-21}$$

$$V_{像y} = 0 \tag{10-22}$$

公式(10-21)也可用§2-4中(2-9)式表示的像点坐标 $x = fX\cos\alpha/H$ 直接对时间求导得出。需要注意的是，公式(10-21)中的侧倾角 φ 在这里就是扫描角 α。

倾斜全景航空摄影的情况要复杂得多，这里不再讨论。

§10-2 像移补偿方法和补偿机构

像移补偿的目的就是消除曝光瞬间胶片与像之间的相对运动。目前在垂直分幅航空摄影机里采用的前移补偿方法和补偿机构主要有以下几种。

1. 摇摆整机法 在曝光过程中使摄影机在其座架内绕图 10-2 所示的 y 轴摇摆。如图 10-7(a)所示就是一种采用这种补偿方法的横卧式航空侦察摄影机。补偿凸轮就是这种摄影机的像移补偿机构。显而易见，这不是一种严格的补偿方法，因为它相当于一架前倾角度变化的前倾摄影机，由它产生的像移速度由(10-13)或和(10-18)式描述，即像移速度与像点的坐标有关。而这种像移补偿机构的补偿速度，如图 10-7(b)所示，由下式确定

$$x = f\text{tg}\beta_x$$

故得

$$V_{补x} = \frac{dx}{dt} = f\frac{1}{\cos^2\beta_x}\frac{d\beta}{dt} \tag{10-23}$$

式中 $d\beta/dt$ 是摄影机绕 y 轴摇摆的角速度。

(10-23)式说明，像片上各点的补偿速度也随其坐标而异，并且(10-23)式与(10-13)式不同。因此，采用这种补偿方法，理论上只有一个像点(一般为像片的主点)能够得到完全补偿。

这种方法要求有较大的动力来驱动整个摄影机摇摆。尽管如此，仍有不少航空摄影机采用这种补偿方法。

2. 摆动反射镜法 与摇摆整机法的补偿原理相似，也可以采用其它的光学方法，使光轴以一定的方式旋转。例如图 10-8 所示，将摄影机安装成卧式，光轴旋转由反射镜的摆动来实现。这种补偿方法也有原理上的误差，即视场不同的像点有不同的补偿速度。

在图 2-25 所示的光棒式全景航空摄影机里，利用前反射镜的摆动不但可以进行前移补

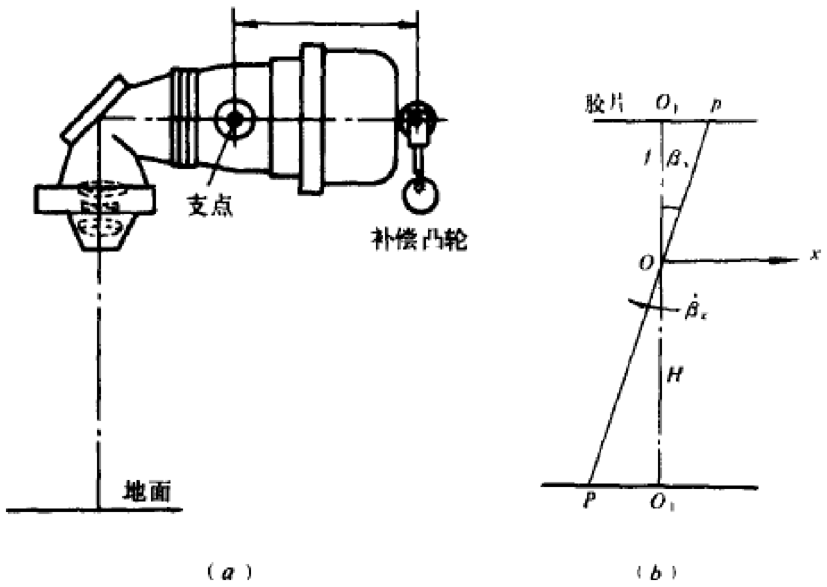


图 10-7　摇摆整机法像移补偿原理和机构

偿，同时还可以补偿由飞机的俯仰或偏航所产生的像移。

3. 移动胶片法　在曝光过程中使胶片以一定的速度作补偿运动，如果补偿速度与由飞行器前进运动产生的像移速度在曝光瞬间大小和方向都相等，即 $V_{补}=V_{像}$，那末这种补偿方法没有原理上的误差。但是，在实际的补偿机构中要解决下面两个结构上的问题。

第一，在每一个工作循环内胶片需以不同的速度运动，曝光时以补偿速度 $V_{补}$ 运动，曝光结束后快速将曝光的胶片从焦面上更换下来。

图 10-9 所示为实现上述不同速度运动的输片机构原理。在这种等量传递输片机构中，量片辊以恒定的速度连续旋转，每个工作循环从供片轴上退下等量的胶片，并输送到收片轴上收卷起来。在量片辊与收片轴之间的胶片以 $V_{量}$ 作匀速运动。

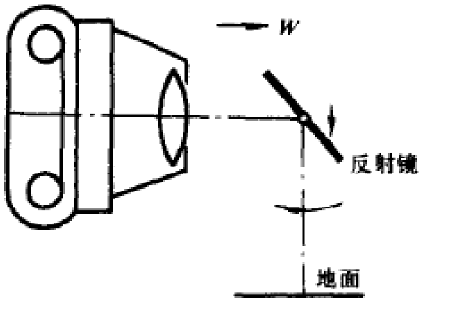


图 10-8　摆动反射镜法像移补偿原理

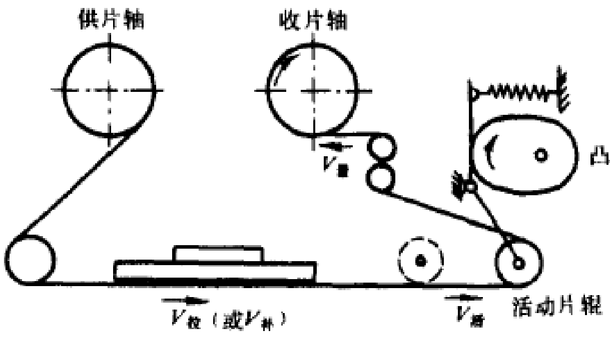


图 10-9　移动胶片法像移补偿原理和机构

由凸轮通过杠杆控制的活动片辊是使焦面上的胶片产生不同的运动速度的像移补偿机构。当活动片辊向右运动时，它使焦面上的胶片快速移动，同时把一部分已曝光的胶片暂时储存在它的左边；当活动片辊向左运动时，它把储存的一部分胶片放出来给量片辊输送到收片轴上，结果使焦面上胶片运动速度降低。恰当地设计凸轮机构，可以使曝光时胶片的运动速度与像移速度相等，从而达到完全补偿的目的。

在如图所示的实际机构中，活动片辊的运动轨迹是一段圆弧。凸轮工作轮廓的设计要根据实际机构的几何关系和结构参数来进行，并要考虑活动片辊在往返运动中两次改变运动方向和速度大小时，加速和减速在机构和胶片中产生的过载力。要按照尽量减小这种过载力的原则

来设计凸轮过渡部分的曲线。

这里，为了讨论这种补偿方法的基本原理，假设活动片辊在往返运动中都是匀速直线运动，且往返运动的速度 $V_{活}$ 大小相同，方向与焦平面平行。

当活动片辊向左运动时，胶片在焦面上的运动速度应为所需要的前移补偿速度

$$V_{补} = V_{像} = W \frac{f}{H} \tag{10-24}$$

它与量片辊的输片速度 $V_{量}$ 和活动片辊的运动速度 $V_{活}$ 之间显然有如下关系

$$V_{补} = V_{量} - 2V_{活} \tag{10-25}$$

胶片在活动片辊向左运动的时间 $t_{补}$ 内移动了一段距离 $V_{补} V_{补}$。为了满足等量输片的要求，活动片辊向右快速拉片时的运动速度应为

$$V_{拉} = V_{量} + 2V_{活} = \frac{l_x + c - V_{补} t_{补}}{t_{拉}} \tag{10-26}$$

式中 $t_{拉}$ 为活动片辊向右运动的时间，l_x 为像幅尺寸，c 为幅面的间隔。

由于量片辊在摄影过程中连续工作，即

$$t_{补} + t_{拉} = T \tag{10-27}$$

其中

$$T = \frac{l_x(1 - R_x)}{W} \frac{H}{f}$$

是垂直分幅航空摄影机进行单航线摄影时的工作周期(§2-4)。

第二，需要解决曝光时胶片运动和展平之间的矛盾。为此，在有的航空摄影机里采用活动压板的结构。曝光时展平压板和胶片同时作补偿运动。曝光后压板与胶片分离并反向移回初始位置。

图 10-10 所示为一种展平压板移动以补偿像移的机构原理图。

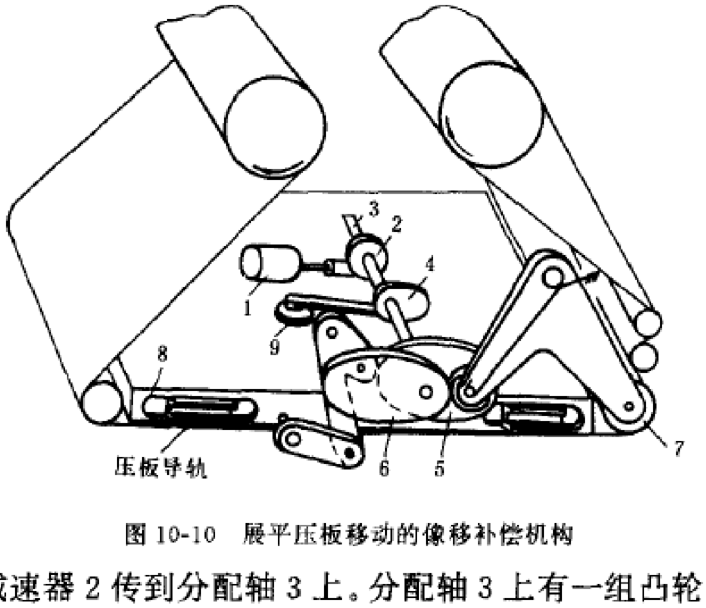


图 10-10 展平压板移动的像移补偿机构

电机 1 的动力经减速器 2 传到分配轴 3 上。分配轴 3 上有一组凸轮：中间的凸轮 4 控制抽气阀门 9；两端各有两个凸轮 5 和凸轮 6(图中只画出一端的)，分别控制活动片辊 7 和压板 8 的运动。

当活动片辊 7 向右移动，快速拉动胶片时，凸轮 4 使抽气阀门 9 转换到压板气室和大气相通的位置，胶片与压板分离；同时凸轮 5 使压板 8 向左移回原始位置。反之，当凸轮 5 开始使压板向右作补偿运动时，凸轮 4 使抽气阀门 9 转换到压板气室与抽气系统相通的位置，胶片被外

部大气压力展平在压板上，与压板一起以补偿速度向右移；同时活动片辊 7 向左返回，将储存的胶片供给收片轴收卷。

4. 移动镜头法 胶片移动的补偿方法，也可用镜头移动的方法来代替。这时镜头需作往复运动：曝光时以$-\overline{V}_{像}$的速度移动，曝光后恢复原始位置。

在曝光过程中使相机的物镜 O 沿与地速 W 相同的方向移动，达到消除影像与胶片之间的相对运动，如图 10-11 所示。由图可见，为保持影像在胶片上不动，则应有

$$V_{镜} = W\frac{f}{H+f} \tag{10-28}$$

因 $V_{像} = -W\frac{f}{H}$，则

$$V_{镜} = -V_{像}\frac{1}{1+f/H} \tag{10-29}$$

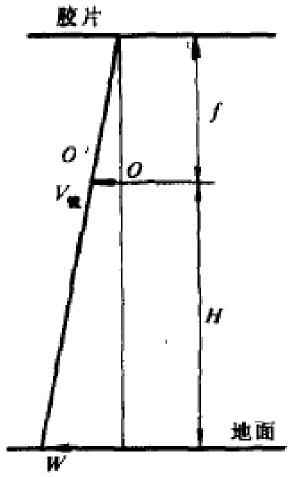


图 10-11　移动镜头法像移补偿的原理

由于 $f \ll H$ 故可取

$$V_{镜} \approx -V_{像} = W\frac{f}{H} \tag{10-30}$$

在垂直全景航空摄影机中，常采用余弦曲线的凸轮来推动镜头，使镜头沿飞行方向作(10-21)式所规定的补偿运动，来补偿飞行器前进运动所引起的像移。

5. 旋转光楔法 在光学补偿方法中，也可利用改变镜头前面附加的光楔楔角，使成像光线反向移动而实现像移补偿。它的原理与我们在第八章里所介绍的测距器一样，都是利用光楔使光线偏折。但在测距机构里利用的是光楔楔角大小与距离的关系，而在这里则利用的是楔角变化速度与光线折转角的变化速度之间的关系。

图 10-12 示楔角为 α 的光楔使光线折转的情形，折转角(偏向角)ω 为

$$\omega = (n-1)\alpha$$

式中 n 为玻璃折射率。因此，在物镜前加入光楔的结果，像点在胶片上移动了一个距离 r

$$r \approx \omega f = (n-1)\alpha f \tag{10-31}$$

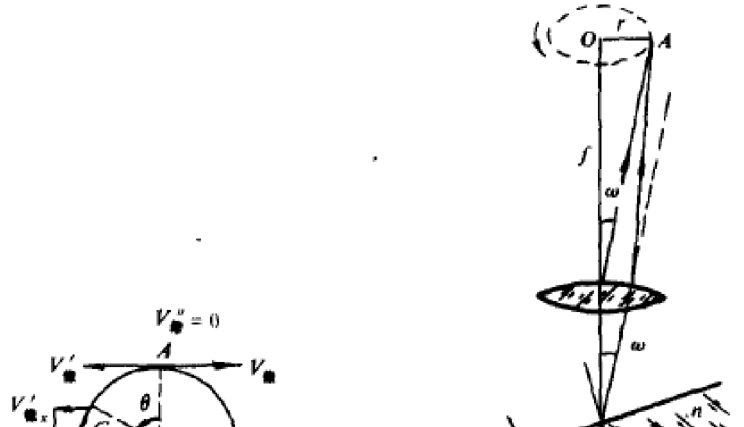


图 10-12　旋转光楔法像移补偿的原理

当光楔旋转时，像点即绕原来未加入光楔时的位置 O 点旋转，旋转的轨迹圆的半径即为 r。设光楔旋转速度为

$$\Omega = 2\pi N$$

式中 N 为光楔的转速，则像点在胶片上的运动速度

$$V'_{像} = \Omega r = 2\pi N r = 2\pi(n-1)\alpha f N \tag{10-32}$$

$V'_{像}$的方向为圆周的切线方向。

因此，如果我们适当选择光楔参数使 $V'_{像}$的大小等于像移速度 $V_{像}$，那么当光楔转到主截面为 OA 的位置时，$V'_{像}$的方向恰巧与 $V_{像}$ 相反，在那一瞬间，像点 A 的速度等于零，即像移完全被补偿。实际上，由于曝光时间不可能等于零，快门需要在光楔一定的转角范围内打开，因此 $V'_{像}$的大小和方向不可能始终与 $V_{像}$ 相同，这就使像移不能完全得到补偿。

采用光楔补偿器，还有这样一个原理上的缺点：在整张像片上像移的补偿是不均匀的。

前面我们只讨论了光轴上的像点的情形。对于视场中其它任一点的情形与轴上点的情形不同。由图 10-13 可见，视场角为 β 的一点地物，经过光楔后偏折一角 $\varphi'-(\alpha+\beta)$。由于光楔而使像点在胶片上的移动量 r_β 等于

$$r_\beta = f[\mathrm{tg}(\varphi'-\alpha) - \mathrm{tg}\beta] \tag{10-33}$$

这样，由于光楔旋转而产生的像点移动速度为

$$V'_{像\beta} = \Omega r_\beta \tag{10-34}$$

它是视场角 β 的函数。这就意味着，当我们按视场中心一点考虑像移补偿时，其余各点的补偿不完全程度随着视场角的增大而增大。由此可见，光楔像移补偿器不宜应用于广角航空摄影机里。

在实际相机里通常采用两块楔角相同的光楔以同样角速度作相反方向旋转，图 10-14 中就是这样一种补偿器的结构图和传动示意图。采用这样的结构，可以将单个光楔所产生的与像移速度成垂直的补偿速度分量抵销掉。

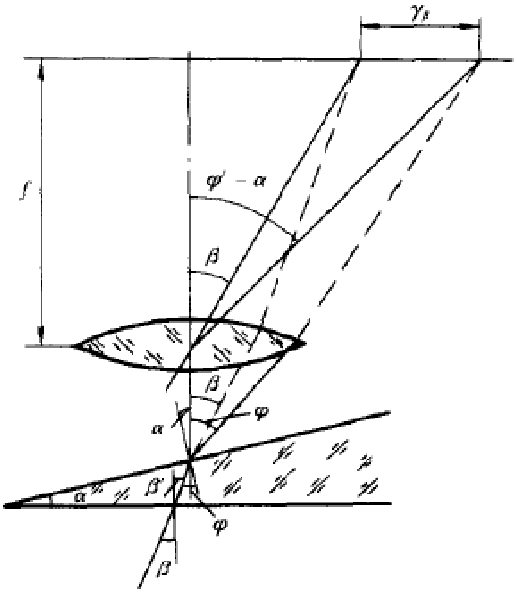


图 10-13 旋转光楔产生的补偿速度随视场角的变化

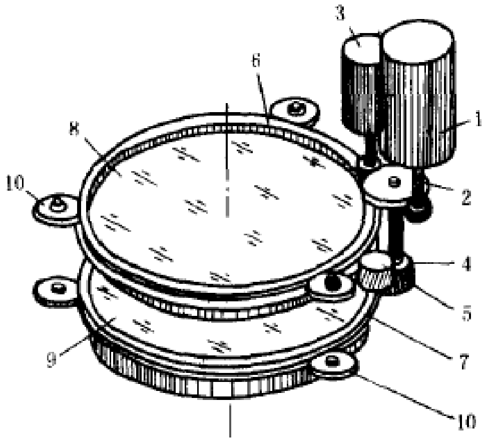


图 10-14 旋转双光楔像移补偿机构
1—补偿电机，3—测速发电机，2，4，5—齿轮，6，7—镜框，8，9—光楔，10—导轮。

主要参考文献

[1]李德熊主编.摄影仪器.兵器工业部教材编审室,1986

[2]摄影与感光材料基础知识.中国人民解放军总参谋部第二部,1976

[3]菊池真一.照相化学.丁一译.北京:科学出版社,1983

[4]天津感光胶片厂资料室编译.感光材料生产基本知识.北京:轻工业出版社,1975

[5]John S. Carroll, Photographic LAB Handbook, 5th ed. ,American Photographic Book Publishing Co. , 1979

[6]Ralph E. Jacobson (revised), The Manual of Photography, 7th ed. , Butterworth & Co. , 1978

[7]Philip N. Slater, Remote Sensing——Optics and optical systems, Addison－Wesley, 1980

[8]俞浩清主编.摄影与空中摄影学.北京:测绘出版社,1985

[9]R. N. Colwell, ed. , Manual of Remote Sensing, V. I, 2nd ed. ,American Society of Photogrammetry, 1983

[10]T. H. James, ed. , The Theory of Photographic Process, 4th ed. , Macmillan, 1977

[11]束越新.颜色光学基础理论.济南:山东科学技术出版社,1981

[12]徐振亚.彩色摄影.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1973

[13]汤顺青主编.色度学.北京:北京理工大学出版社,1990

[14]Michael I. Sobel, Light, The University of Chicago Press, 1987

[15]Kurt Nassau, The Physics and Chemistry of Color——the fifteen causes of color, John Wiley & Sons, 1983

[16]李德熊.航空摄影.北京:科学出版社,1980

[17]李德熊.遥感技术.北京:北京工业学院出版社,1987

[18]Grant Haist, Modern Photographic Processing, V. I, John Wiley & Sons, 1979

[19]John M. Sturge, ed. , Neblette's Handbook of Photography and Reprography——materials, processes and systems, 7th ed. ,Van Nostrand Rainhold, 1977

[20]L.罗贝尔,M.杜伯华.感光测定.王慧敏译.北京:中国电影出版社,1980

[21]D. A. Spencer, The Focal Dictionary of Photographic Technologies, Focal Press, 1973

[22]罗·特·赖恩主编.彩色感光测定原理.唐志健译.北京:中国电影出版社,1983

[23]贺修桂等.摄影手册.北京:中国电影出版社,1983

[24]王兆远主编.照相机.北京:机械工业出版社,1991

[25]阿尔贝茨,克赖林.摄影测量袖珍手册.陈惠萍,徐凤妹译.北京:解放军出版社,1987

[26]Paul R. Wolf, Elements of Photogrammetry, 2nd ed. , McGraw－Hill, 1983

[27]田村稔等.照相机技术基础.杭州照相机械研究所照相机技术研究小组译.北京:机械工业出版社,1985

[28]小仓磐夫.现代照相机和照相物镜技术,傅维乔等译.北京:机械工业出版社,1989

[29]李德熊. 高速摄影,北京:科学出版社,1976
[30]A. C. 杜鲍维克. 高速流逝过程摄影记录,第二版,李德熊译. 北京:科学出版社,1990
[31]A. C. 库奇科. 航空摄影学(原理与质量评价). 蔡俊良,沈鸣岐译. 北京:测绘出版社,1982
[32]D. F. Horne, Lens Mechanism Technology, Adam Hilger, 1975
[33]C. R. Arnold, P. J. Rolls, J. C. J. Stewart Applied Photography, The Focal Press, 1971
[34]沙占祥. 摄影镜头的性能与选择. 北京:中国电影出版社,1989
[35]Я. Е. щербаков,Расчет u Конструпроbаице Аэрофотоаппаратоb,Машгиз,1979
[36]Michael A. Munzer, The System—an in—depth look at the features and specifications of 35 mm camera systems,Functional photography, Sept. 1980,15(5),20—25
[37]李德熊. 自动曝光和曝光参数方程小议. 照相机械,1983(6),14—16
[38]The Newest Nikon,Optical Spectra,May 1980,22—23
[39]李德熊. 航空摄影机中的像移. 工程光学,1978(2),30—45
[40]李仪华. 多谱段摄影. 科学实验,1977(10),9—11
[41]P. N. Slater, Multiband Cameras, Photogrammetric Engineering, June 1972, 543—555
[42]P. N. Slater, Survey of Multispectral Imaging Systems for Earth Observations, Remote Sensing of Environment ,1985(17),85—102
[43]C. B. Pease, Satellite Imaging Instruments——Principles, technologies and operational systems, Ellis Horwood, 1991
[44]Proceedings of SPIE, vol 268, Imaging Spectroscopy, 1981
[45]H. S. Chen, Space Remote Sensing Systems——an introduction, Academuc Press, 1985
[46]T. M. Lillesand, R. W. kiefer, Remote Sensiong and Image Interpretation, John Wiley & Sons, 2nd ed. , 1987
[47]许家隆主编. 转镜式高速摄影. 北京:科学出版社,1985
[48]李德熊. 间歇式高速摄影机中的差相偏心滑轮机构. 光学仪器,1984,6(3),5—10
[49]李德熊. 介绍一种多谱段彩色合成仪. 遥感信息,1986(1),46—47
[50]李士贤. 郑乐年编. 光学设计手册. 北京:北京理工大学出版社,1990
[51]苏大图等. 光学测量与像质鉴定. 北京:北京理工大学出版社,1988
[52]毛秀娟,钱玉洁,高宝林. CXE 杂散光测试仪. 光学仪器,1981(1),33—38
[53]车念曾. 闫达远. 辐射度学和光度学. 北京:北京理工大学出版社,1990
[54]裘然继. 照相机测试与检验(上). 照相机,1984(3),22—27
[55]李德熊. 关于基线式单目测距器的讨论. 照相机,1990(6),16—17
[56]陈启培,孙晶璋. 电子照相机. 上海:上海科学技术文献出版社,1982
[57]谢永忠,王海夫,杨宪国. 照相机自动调焦技术的探讨. 照相机械,1984(2),15—17,(3),10—14
[58]C. B. Kyaгuн,ПроектирoIвание фото-и Кино-Приборов,издание второе, Машгиз, 1976
[59]李为. 光阑片外形轮廓的设计原理. 照相机,1984(4),1—8

[60]耿立中,安文化,车念曾主编。谢一峰,李为,朱涛审校.KA—112A 全景式航空照相机.中国人民解放军空军司令部情报部,1988
[61]安文化.现代照机机技术.北京:北京理工大学出版社,1992
[62]包光祥.照相机数控电路.照相机,1986(2),10—17
[63]包光祥,照相机微处理器控制系统,照相机,1984(4),19—32
[64]中华人民共和国国家标准,GB2923—82,黑白照相与电影摄影用负片感光度计量及其表示方法,国家标准局批准,1982—03—09 发布,1982—12—01 实施
[65]中华人民共和国国家标准,GB2924—82,彩色摄影用负片感光度计量及其表示方法,国家标准总局批准,1982—03—09 发布,1982—12—01 实施
[66]中华人民共和国国家标准,GB9862—88,黑白航空照相胶片感光度和平均斜率测定方法,中华人民共和国化学工业部 1988—09—20 批准,1989—05—01 实施
[67]中华人民共和国国家标准,GB9917—88,照相镜头,中华人民共和国机械电子工业部 1988—06—30 批准,1989—07—01 实施
[68]中华人民共和国国家标准,GB7552—87,摄影镜头分辨率测试图,国家标准局 1987—03—25 发布,1988—01—01 实施
[69]中华人民共和国标准,GB9190—88,照相镜头光圈标记